

Strategien zur Qualitätssteigerung flexibler Rollprofile

Vom Fachbereich Maschinenbau

an der

Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Sebastian Berner

aus Schorndorf

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele

Tag der Einreichung: 6.12.2011

Tag der mündlichen Prüfung: 31.01.2012

Darmstadt 2012

D17

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU) der Technischen Universität Darmstadt.

Dem Institutsleiter Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche gilt mein besonderer Dank für die Förderung und Unterstützung der vorliegenden Arbeit und der Anfertigung des Hauptgutachtens.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele vom Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) danke ich sehr für die Übernahme des Korreferates.

Allen Kollegen und Mitarbeitern des PtU möchte ich für die wunderbare Zusammenarbeit und wertvolle Diskussionen danken. Hierbei gilt mein besonderer Dank Philip Beiter und Martin Storbeck für das kritische Korrekturlesen der Arbeit. Für die sehr wichtige Unterstützung während der Konstruktions- und Aufbauphase der flexiblen Walzprofilieranlage danke ich besonders meinen ehemaligen Studienarbeitern Mark Ortwein und Christian Baier, welche ganz erheblichen Anteil an der Umsetzung der Anlage zum flexiblen Walzprofilieren am PtU haben. Dies gilt im Besonderen auch der mechanischen Werkstatt des PtU und PTW unter der Leitung von Herrn Geißler und im Speziellen Herrn Edwin Kirchner, der phantastische Arbeit bei der Montage geleistet und stets hilfreiche Anregungen hinsichtlich der konstruktiven Umsetzung geboten hat.

Mein Dank geht auch an die Projektpartner aus dem EU-Projekt PROFORM, unter der Leitung von Dr. Marian Gutiérrez von Technalia Labein. Die Inhalte des Projektes haben entscheidend zum Inhalt der vorliegenden Arbeit beigetragen. Hierbei gilt mein besonderer Dank den Projektpartnern Daimler, Gasparini, Mondragon Universitatea, Profilmittel und in ganz besonderen Maße dem Team der Firma DataM Sheetmetal Solutions um Herrn Albert Sedlmaier.

Mein tiefer Dank gilt meiner Familie und meiner Freundin Annika.

Sebastian Berner

Inhaltsverzeichnis

Strategien zur Qualitätssteigerung flexibler Rollprofile	I
Formelzeichen und Abkürzungen	VII
Formelzeichen	VII
Abkürzungen	VIII
1 Einleitung	1
2 Stand der wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse	3
2.1 Walzprofilieren zur Herstellung von Profilbauteilen	3
2.1.1 Konventionelles Walzprofilieren	3
2.1.2 Verfahrensfehler beim konventionellen Walzprofilieren	6
2.1.3 Flexibles Walzprofilieren	8
3 Motivation, Lösungsansatz und Zielsetzung	17
4 Finite Elemente Simulation für die Untersuchungen	19
4.1 Modellentwicklung.....	19
4.1.1 Nichtlineare Finite Elemente Methoden	19
4.1.2 Elementformulierungen	20
4.1.3 FEM Modell für die Untersuchungen.....	27
4.1.4 Abgleich des Simulationsmodells mit dem Realversuch.....	30
5 Analyse des flexiblen Walzprofilierens	33
5.1 Zielgeometrie	33
5.2 Versuchsanlage	35
5.3 Untersuchungen der Bodenverwölbung.....	37
5.3.1 Auftreten und Entwicklung der Bodenverwölbung	37
5.3.2 Sensitivität der Bodenverwölbung auf unterschiedliche Parameter.....	42
6 Strategien zur Qualitätsoptimierung beim flexiblen Walzprofilieren für eine spezielle Geometrie	45
6.1 Zusatzkomponenten in flexiblen Walzprofilieranlagen	45
6.1.1 Niederhaltersysteme in flexiblen Walzprofilieranlagen.....	45
6.1.2 Einfluss der Querverfahrenbewegung am Niederhalter	56

6.1.3	Ein- und ausgangsseitiger Niederhalter	61
6.1.4	Variation der Niederhalteranzahl in der Anlage	62
6.1.5	Position des Niederhalters relativ zum flexiblen Gerüst	65
6.1.6	Variation der Abstützung am Niederhalter	68
6.2	Einflussmöglichkeiten mittels Werkzeuggestaltung, Werkstoff- und Geometrieparameter	70
6.2.1	Einfluss der Einformstrategie	70
6.2.2	Einfluss der Geometrie im Übergangsbereich	75
6.2.3	Einfluss der Blechdicke	76
6.2.4	Einfluss des Materials	78
6.3	Aktive Komponenten in flexiblen Walzprofilieranlagen	80
6.3.1	Aktive mechanische Systeme zur Steuerung der Längsdehnungen	80
6.3.2	Überbiegeaktorik	82
7	Verifikation der Strategien	89
7.1	Niederhaltersysteme	89
7.1.1	Konstruktive Umsetzung	89
7.1.2	Verifikation	91
7.2	Überbiegesystem	95
7.2.1	Konstruktive Umsetzung	95
7.2.2	Verifikation	96
8	Auslegungsrichtlinien zur Prozessgestaltung und Verfahrensbewertung	99
8.1	Grundsätzliche Verfahrensauslegung	99
8.2	Bewertung des Verfahrens	104
9	Zusammenfassung und Ausblick	105
10	Quellenverzeichnis	107
10.1	Literaturverzeichnis	107
10.2	Patente und Gebrauchsmuster	112
11	Anhang	115
11.1	Werkstoffkennwerte der verwendeten Versuchswerkstoffe	115

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
α	°	Biegewinkel
$\Delta\alpha$	°	Biegewinkelschritt
β	°	Überbiegewinkel
σ	N/mm ²	Spannung
σ_{krit}	N/mm ²	Beulspannung
φ_v	-	Umformgrad
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$	-	Formänderungen in den Hauptrichtungen
κ	-	Scherausgleichsfaktor
ν	-	Querkontraktionszahl
η_F	-	Umformwirkungsgrad
θ	°	Konturwinkel
$a_{\text{start}}, a_{\text{trans}}, a_{\text{flex}}$	mm	Abstand der inneren Niederhalterkontaktkörpers vom Profilschenkel
A_d	mm ²	Gedrückte Fläche beim Auswalzen
b	mm	Spannweite des inneren Niederhalterkontaktkörpers
b_1, b_2	mm	Profilbreite im schmalen (b_1) bzw. aufgeweiteten (b_2) Profilbereich
c	mm/s	Wellenausbreitungsgeschwindigkeit
d	mm	Abstand der Niederhalter von den flexiblen Profiliergerüsten
E	MPa	Elastizitätsmodul
f	mm	Abstand der unteren Niederhalterkontaktkörper
fl	mm	Flanschlänge
F	N	Kraft

F_w	N	Walzkraft
h	mm	Profilhöhe
k^*	-	Beulfaktor
k_f	N/mm ²	Fließspannung
L_e	mm	Charakteristische Elementkantenlänge
L, L_s	mm	Einformlänge
m	kg	Masse
M_b	Nmm	Biegemoment
R	mm	Konturradius
R_1, R_2	mm	Biegeradius 1, Biegeradius 2
$R_{\text{druck}}, R_{\text{zug}}$	mm	Zuschnittsradius im Druck- bzw. Zugbereich
R_m	MPa	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	MPa	0,2%-Dehngrenze (Streckgrenze)
s_h	mm	Schenkellänge, Schenkelhöhe
t	mm	Blechdicke
T	K	Temperatur

Abkürzungen

3D	Dreidimensional
ALE	Arbitrary Lagrangian Eulerian
CAD	Computer Aided Design
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
E-Modul	Elastizitätsmodul
EU	Europäische Union
FE	Finite Elemente
FEM	Finite Elemente Methode
GOM	Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH
PM-Stahl	Partiell Martensitischer Stahl

PtU	Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen der Technischen Universität Darmstadt
$S_1 \dots S_5$	Umformstufe 1 bis 5
TRIP	<u>T</u> Ransformation <u>I</u> ntroduced <u>P</u> lasticity
TU	Technische Universität

1 Einleitung

Ausgelöst durch einen immer stärker werdenden Konkurrenzdruck stehen viele Branchen vor der Herausforderung, eine aufgrund der stärker individualisierten Kundennachfrage steigende Variantenvielfalt mit einem steigenden Kosten-, Preis- und Zeitdruck zu vereinbaren. In einem besonderen Maße ist hiervon die Automobilindustrie betroffen [PIL99]. Fahrzeughersteller versuchen in hochdynamischen Märkten, mit immer mehr spezialisierten Produkten, Kundenwünsche zu befriedigen. Zusätzlich ergeben sich immer kürzere Produktentwicklungszeiten und -lebenszyklen. Ein Weg, diesem Trend im Automobilbau zu folgen, liegt in einer Modularisierung der Fahrzeuge [JUN03]. Hierbei können an definierten Schnittstellen einzelne Module kombiniert werden, um Fahrzeugderivate abzubilden [FRI08a].

Ein entscheidender Faktor, diesen Trends gerecht zu werden, ist die Entwicklung neuer Fertigungskonzepte für Strukturbauteile in Fahrzeugkarosserien. Mit geringem Aufwand neu konfigurierbare Anlagen ermöglichen die Realisierung von Familien geometrisch verwandter Bauteile mit einem Werkzeugsatz und relativ geringem Investitionsvolumen. Hier scheint die Technologie des Walzprofilierens außerordentlich chancenreich [SWE03]. Neben Anforderungen, auch kleinere Losgrößen wirtschaftlich darzustellen, steigt der Druck auf die Automobilindustrie immer weiter an, das Fahrzeuggewicht und somit den Emissionsausstoß zu reduzieren [GRO07]. Der Einsatz hoch- und höchstfester Stähle gilt hier als probates Mittel zur Erfüllung solcher Anforderungen. Diese Werkstoffklassen sind durch Walzprofilieren gut umformbar, da sich Formabweichungen wie bspw. Rückfederung verhältnismäßig einfach kalibrieren lassen. Das Verfahren ermöglicht zusätzlich durch die einfache Skalierbarkeit der Bauteile das Fertigen von Bauteilfamilien. Allerdings sind die Formgebungsmöglichkeiten beim konventionellen Walzprofilieren in Bezug auf Querschnittsänderungen innerhalb des Bauteils deutlich eingeschränkt, wodurch viele Bauteilklassen nicht darstellbar sind oder aufwändige, dem Walzprofilieren nachgeschaltete Zusatzoperationen notwendig werden.

Das flexible Walzprofilieren bietet hier erweiterte Möglichkeiten der Formgebung rollgeformter Profilbauteile. Mittels eines speziellen Werkzeugsystems sind über der Profillänge veränderliche Querschnittsgeometrien darstellbar. Wirtschaftliche Umsetzungen des Verfahrens liegen derzeit trotz seines hohen Potentials bisher nur im Bereich Fassadenbau [DÖH06]. Als grundlegend hierfür sind Ressentiments hinsichtlich der erreichbaren Bauteilqualitäten und des Anlageninvests zu nennen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden Untersuchungen zur Optimierung der Bauteilqualität flexibel rollprofilierter Profilbauteile durchgeführt und Methoden zur Qualitätsverbesserung an beispielhaften Zielgeometrien diskutiert. Die im Rahmen der Arbeit entwickelten und vorgestellten Strategien zur Qualitätssteigerung basieren zum einen auf Methoden zur Auslegung

konventioneller Walzprofilierprozesse und zum anderen auf Einrichtungen und Anlagenkomponenten, welche speziell für das flexible Walzprofilieren entwickelt werden. Diese nehmen Bezug auf die über der Profillänge variierenden Bauteileigenschaften und den daraus resultierenden Anforderungen an Werkzeugsysteme. Ziele bei diesen Entwicklungen sind, zum einen die Verbesserung der Maßhaltigkeit breitenveränderlicher Rollprofile und zum anderen die Kosten für flexible Walzprofilieranlagen nur in bedingtem Maße negativ zu beeinflussen. Hierdurch soll die Wettbewerbsfähigkeit des Verfahrens gegenüber konventionellen auf dem Tiefziehen basierenden Anlagenlinien unterstützt werden. Insofern sind die vorgeschlagenen Methoden als Vorschläge zu sehen, welche je nach Bauteilanforderungen zu einem Anlagenkonzept kombinierbar sind. Hierdurch sollen Anregungen zum Layout flexibler Walzprofilieranlagen während der Entwicklungsphase gemacht werden.

Die vorgestellte Arbeit entstand zu einem großen Teil im Rahmen des EU geförderten Forschungsprojektes PROFORM.

2 Stand der wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse

2.1 Walzprofilieren zur Herstellung von Profilbauteilen

Profile aus Stahl mit konstantem Querschnitt besitzen ein großes Anwendungsspektrum, z.B. in der Möbelindustrie, dem Fahrzeugbau und dem Bauwesen. Sie stellen kostengünstige Konstruktionselemente mit einem günstigen Eigengewicht-Tragfähigkeitsverhältnis dar. Industriell werden Stahlprofile zumeist entweder kontinuierlich über das Walzprofilieren oder diskontinuierlich über automatisierte Schwenk- oder Gesenkbiegeprozesse hergestellt [GRO07].

2.1.1 Konventionelles Walzprofilieren

Walzprofilieren ist nach DIN 8582 [DIN8582] dem Bereich Kaltumformen zuzuordnen. Die Blechstärke wird bei dem Biegeverfahren nur ungewollt verändert, wodurch das Verfahren im Bereich der Blechumformung positioniert ist. Es können sowohl Stahlwerkstoffe als auch NE-Metalle profiliert werden. Hinsichtlich des darstellbaren Formenspektrums konkurriert das Walzprofilieren mit den Herstellungsverfahren Abkanten bzw. Gesenkbiegen und dem Gleitziehbiegen. Die Auswahl für das jeweilige Verfahren erfolgt über die zu fertigende Losgröße. In Bezug auf mittelgroße bis große Serien hat das Walzprofilieren eine wichtige wirtschaftliche Bedeutung. Bei der Herstellung von Strukturbauteilen im Fahrzeugrohbau konkurriert das Walzprofilieren darüber hinaus mit dem Tiefziehen. Unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten bietet das Walzprofilieren in Hinsicht auf die Ausnutzung des eingesetzten Blechwerkstoffs deutliche Vorteile gegenüber dem Tiefziehen. Verfahrensbedingt entsteht bei der Zug-/Druckumformung (Tiefziehen) ein hoher Verschnittanteil durch die erforderlichen Niederhalterflächen, welcher später als Abfall anfällt. Trotz massiver Bemühungen zur Platinenoptimierung wird dadurch nur ein Materialausnutzungsgrad von meist 60% in der Tiefziehtechnologie erzielt [FÜL10].

Unter den Biegeverfahren ist das Walzprofilieren im Bereich der Biegeumformung mit drehender Werkzeugbewegung anzusiedeln. Das Bauteil wird in hintereinander angeordneten Umformstufen bestehend aus Ober- und Unterrollen und gegebenenfalls Seitenrollen schrittweise zur fertigen Querschnittsgeometrie eingeformt. Im Regelfall beinhaltet die Walzprofilierstrecke die Vorbereitung des Coils, indem dieses von der Haspel abgewickelt und im Bandrichtapparat gerichtet wird (vgl. Abbildung 2-1). Anschließend können nach einer Vorratsschleife optional Zusatzbearbeitungen wie Lochungen eingebracht werden. Das Band durchläuft eine weitere optionale Vorratsschleife, um in der folgenden Walzprofilierstrecke eingeformt zu werden. Diese besteht je nach Komplexität der Profilgeometrie aus bis zu 30 oder mehr Umformstufen mit eventuell folgender Kalibriereinheit [DOE10]. Abschließend durchläuft das Profil eine Ablängeinheit, welche das Produkt auf Bauteillänge abtrennt. Dieser

Aufbau bringt einen der großen Flexibilitätsvorteile des Walzprofilierens mit sich, da lediglich durch Anpassung der Profillänge unterschiedliche Bauteilfamilien ohne Werkzeugwechsel herstellbar sind. Ein weiterer Vorteil des Walzprofilierens gegenüber dem Tiefziehen liegt in der Verarbeitbarkeit von Profilen mit höchsten Oberflächenanforderungen. Aufgrund der Kontaktbedingungen kommt es zu einer nur geringen Beeinträchtigung des Werkstücks durch die Werkzeuge. Der fast ausschließlich punkt- bis linienförmige Werkzeugkontakt beeinträchtigt die Oberflächenqualität des umgeformten Bauteils in Verbindung mit nur geringem Schlupf zwischen Werkzeug und Werkstück nur marginal, so dass sich das Verfahren sogar für die Verarbeitung von lackierten Blechen eignet [GAL06], [HAL06].

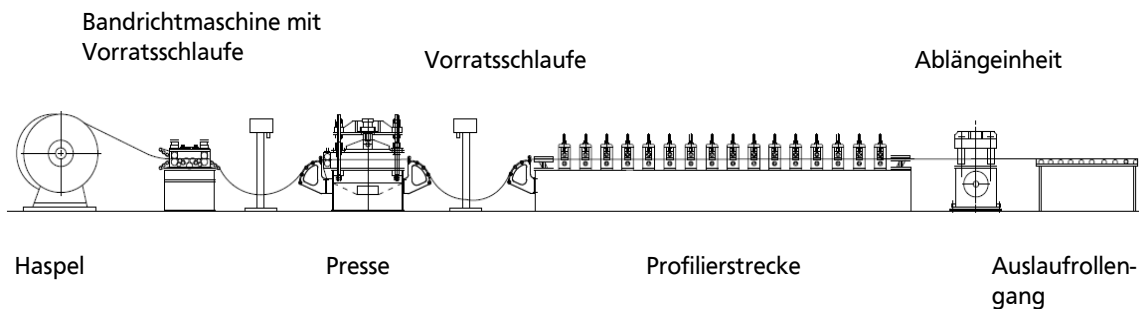


Abbildung 2-1: Konventionelle Walzprofilieranlage nach [HAL06]

Der Werkstofffluss und die Umformrichtung liegen beim Walzprofilieren senkrecht zueinander. Hierdurch kommt es nicht nur zu einer reinen Biegung, sondern vielmehr zu einer räumlichen Einformung zwischen den Umformstufen. Diese ist darauf zurückzuführen, dass die Bandkante eine längere Strecke zurücklegen muss als die Biegekante (vgl. Abbildung 2-2). Bei fehlerhafter Auslegung kann es zu ungewünschten plastischen Längsdehnungen der Bandkante kommen.

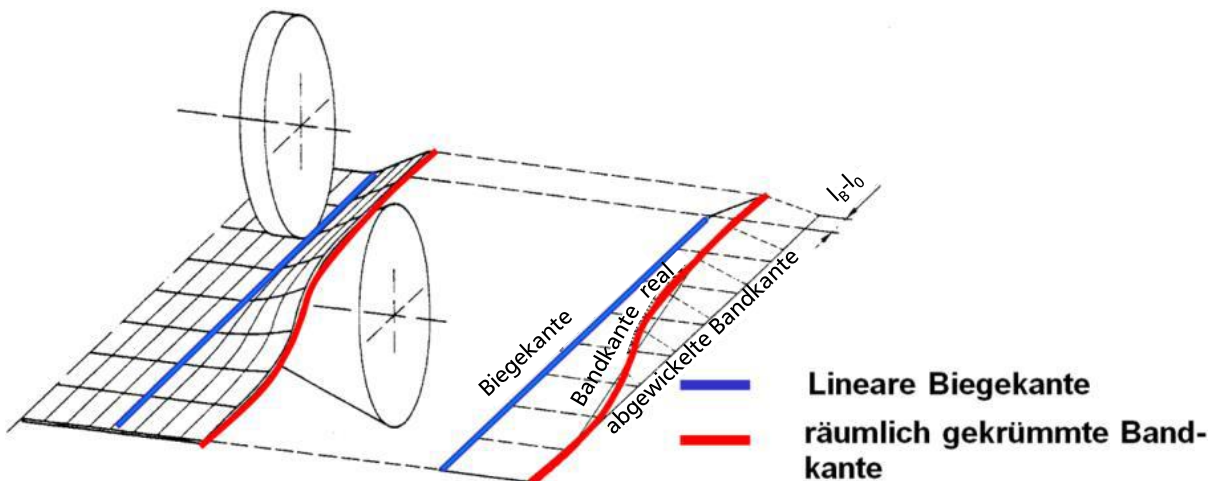


Abbildung 2-2: Abbildung der Einformlänge am Beispiel eines U-Profils [STR96]

Da die räumliche Einformung ursächlich für Verfahrensfehler wie beispielsweise Faltenbildung am Profilschenkel sein kann, wurde dies im Rahmen mehrerer Arbeiten

untersucht, um somit eine Grundlage für die Prozessauslegung konventioneller Walzprofilierprozesse zu schaffen. [BHA84] entwickelte eine einfache Formel zur Ermittlung der Einformlänge auf Basis weniger geometrischer Parameter. So ergibt sich bei einem U-Profil mit der Schenkellänge s_h und der Blechdicke t die Einformlänge L bei einer Umformstufe mit dem Biegewinkelschritt $\Delta\alpha$ zu:

$$L = s_h \sqrt{8 s_h \Delta\alpha / 3 t} \quad \text{Formel 2-1}$$

Dieser, für ein U-Profil entwickelte formelmäßige Zusammenhang basiert auf der Minimierung der bei der Umformung auftretenden Energien. Aufgrund der Komplexität wurden die folgenden Annahmen zur Vereinfachung getroffen:

- (i) Ideal plastisches Materialverhalten
- (ii) Die Biegung findet nur in der Biegekannte statt, Längsbiegung des Flansches wird vernachlässigt
- (iii) Die Form des Flansches entsteht aufgrund der Minimierung der plastischen Arbeit

Trotz dieser Vereinfachungen konnten gute Übereinstimmungen mit experimentellen Untersuchungen an U-Profilen aus Aluminium und Stahlblech mit geringer Festigkeit nachgewiesen werden [BHA84].

[LIN07a] zeigt jedoch, dass die Einformlänge, speziell bei hochfesten Stahlgüten, von den Werkstoffparametern abhängt. [LIN07b] entwickelt hierfür auf Basis von numerischen Simulationen eines U-Profils mit unterschiedlichen Materialkennwerten einen formelmäßigen Zusammenhang für die Einformlänge L_s in Abhängigkeit von der Schenkellänge s_h , dem Differenzwinkel $\Delta\alpha$, der Streckgrenze $R_{p0,2}$ und der Blechdicke t .

$$L_s = 12 \frac{s_h^{0.8} \Delta\alpha^{0.41} R_{p0,2}^{0.07}}{t^{0.25}} \quad \text{Formel 2-2}$$

Neben analytischen Ansätzen kommen in der Prozessauslegung Finite Elemente Simulationen zum Einsatz. Hierzu wird entweder auf kommerzielle, speziell für das Walzprofilieren entwickelte Lösungen wie Copra FEA RF oder Ubeco Profil zurückgegriffen oder es werden Walzprofiliersimulationen in allgemeinen Finiten Elemente Programmen entwickelt. Paralikas et al. untersuchten den Einfluss von unterschiedlichen Parametern auf Längsdehnung und Scherbeanspruchung beim Walzprofilieren eines U-Profils. Eine Simulationsmatrix mit den Parametern Gerüstabstand, Rollendurchmesser, Profiliergeschwindigkeit und Walzspalt wurden hierbei mittels FEM Modell in LS Dyna untersucht. Die Parameter innerhalb der Matrix wurden hinsichtlich ihres Einflusses auf die Längsdehnungen an einem U-Profil analysiert und bewertet. Aus den Ergebnissen konnte die Schlussfolgerung gezogen werden, dass im Speziellen der Gerüstabstand einen Haupteinfluss auf die Profilgeometrie hat [PAR10].

Aufgrund der hohen Rechenzeiten in der Simulation von Walzprofilierprozessen sind Untersuchungen zur Beschleunigung dieser im Fokus verschiedener Arbeiten. [FAR02]

untersuchte die Biegewinkelfolge mittels Abgleich des Beulens der Profilschenkel im plastischen Bereich. Hierzu wurde ein vereinfachtes FEM Modell für den eingeformten Profilschenkel entwickelt und die Beulgrenze der Schenkel bestimmt. Als hauptsächlich ausschlaggebend für die Entwicklung einer geeigneten Einformstrategie wurde das Verhältnis von Blechdicke zu Schenkellänge identifiziert. Ein größeres Verhältnis von Blechdicke zu Schenkellänge bedingt einen Anstieg der Beulgrenze, wodurch die Anzahl der notwendigen Einformstufen reduziert werden kann. Der Ansatz zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen an einem U-Profil aus [FEW90] und Kiuchis Ansatz zur Profilblumenauslegung [KUI84]. [ABR11] schlägt zur Beschleunigung von Walzprofiliersimulationen die Ausnutzung von stationären Zuständen im Profil während der Einformung vor. Hierbei werden jedem Punkt des Profils in der Umformzone die in der FEM berechneten Verschiebungen und Dehnungen übergeben, bis das Profil in eine neue Umformstufe läuft. Erst dann werden wieder neue Zustandsgrößen berechnet. Bei der Berechnung großer Modelle kann hiermit eine deutliche Reduktion der Rechenzeit gegenüber konventionellem Modell Aufbau erzielt werden. Neben reinem Lagrange-Ansatz, welcher in den gängigen kommerziellen FEM Simulationsprogrammen zum Walzprofilieren genutzt wird, ist in [BOM09] die Simulation von Walzprofilierprozessen mit Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) Formulierung vorgeschlagen. Gegenüber dem reinen Lagrangeschen Ansatz sind hierbei die Freiheitsgrade von Netz und Material entkoppelt. [BOM09] konnte speziell für große Simulationsmodelle eine deutliche Beschleunigung der Rechenzeit bei gleichzeitig hoher Ergebnisgüte feststellen.

2.1.2 Verfahrensfehler beim konventionellen Walzprofilieren

Wie zuvor erörtert, können bei fehlerhafter Prozessauslegung Bauteilfehler auftreten (Abbildung 2-3). Diese Bauteilfehler lassen sich unterteilen in globale geometrische Abweichungen, Rückfederungen und Risse. Globale Bauteilfehler wie Profilhakenbildung in Längsrichtung, Verdrillung oder Faltenbildung haben ihre Ursache häufig in einer falschen Auslegung der Profilblume bzw. der Winkelfolge beim Profilieren. Kommt es beispielsweise im Prozess zu einer zu großen plastischen Dehnung der Bandkante in Profillängsrichtung, kann dies zu Falten oder einer ungewünschten Profilkrümmung führen. Dieser Effekt kann auch durch ungleichmäßiges Auswalzen unterschiedlicher Profilbereiche hervorgerufen werden. Zum Kalibrieren solcher Bauteilfehler werden in der Regel Kalibrierstufen am Ende der Profilierlinie eingefügt. Durch deren Einsatz lassen sich Verdrillung und Längsbogen beseitigen. Nach [HAL06] ist eine solche Einheit so auszuführen, dass diese nicht nur aus der Profilierebene verschiebbar ist, sondern gleichzeitig um den Werkzeugkontaktbereich schwenkbar ausgeführt ist.

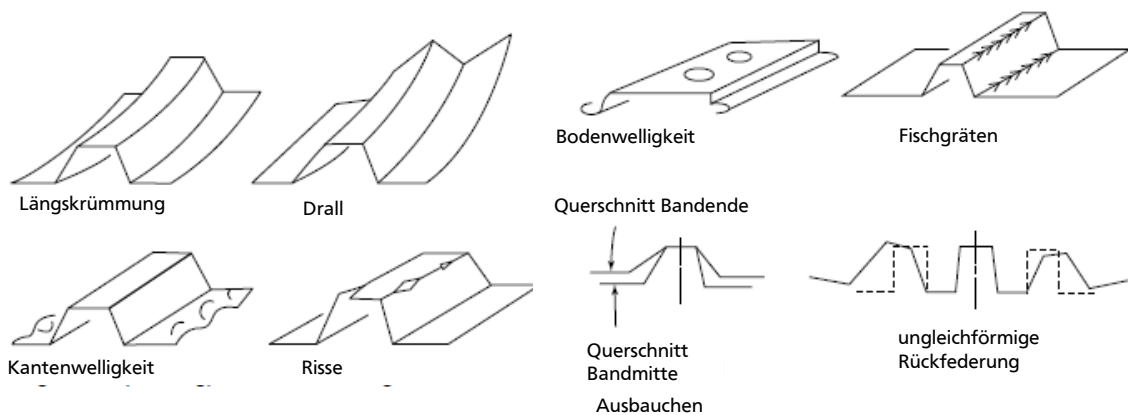


Abbildung 2-3: Typische Bauteilfehler beim konventionellen Walzprofilieren [HAL06]

Speziell im Hinblick auf die Verarbeitung hoch- und höchstfester Stahlgüten zeigen sich häufig Rückfederungsproblematiken. Diese können zwar durch geeignete Auslegung der Biegewinkelschritte und Gestalt der Umformwerkzeuge eingestellt werden, bei Materialschwankungen innerhalb einer Charge kann dies jedoch zu erheblichen Produktionsausfällen führen [GRO08]. Ansätze, die Rückfederung mittels spezieller Kalibrierstufen im Prozess zu reduzieren, können hier gezielt Abhilfe schaffen. [HEN09] beschreibt ein geregeltes Werkzeugsystem, welches am Ende einer Walzprofilierstrecke eingesetzt werden kann, um einen gemessenen Biegewinkel auf den Zielbiegewinkel in einem geregelten Prozess zu kalibrieren. Das Werkzeugsystem bietet die Möglichkeit, die Seitenrollen auf einer Kreisbahn zu verfahren und dabei den Biegewinkel lokal zu verstellen [HEN09], [P10].

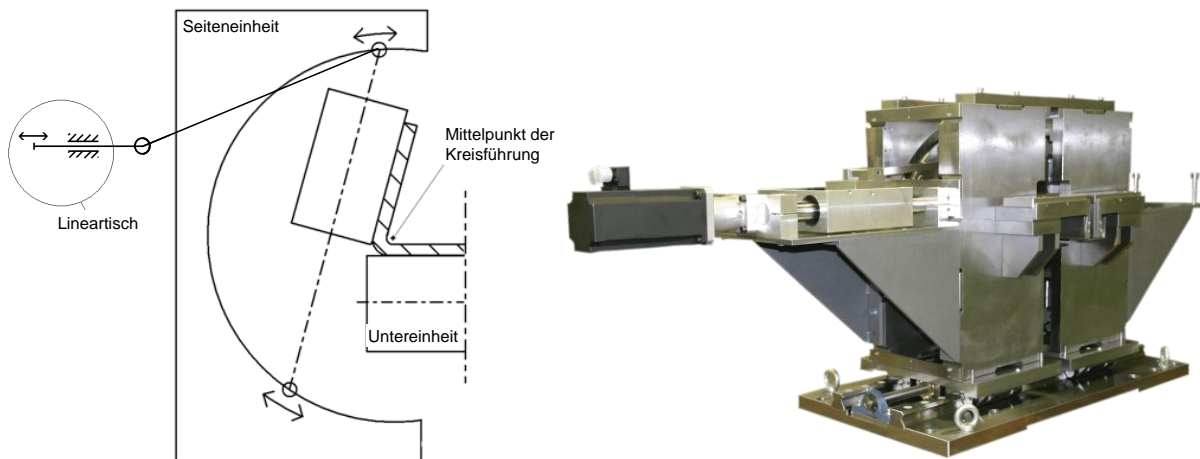


Abbildung 2-4: Überbiegegerüst nach [HEN09]

Das Werkzeugsystem wurde so entwickelt, dass beim Überbiegen der Profilschenkel kein Schlupf zwischen Umformrolle und Profil entsteht (Abbildung 2-4 links). Durch das Legen des Drehpunktes für die Überbiegung in den Biegeradius des Profilschenkels wird eine Relativbewegung zwischen Werkzeug und Bauteil während der Einformung vermieden.

2.1.3 Flexibles Walzprofilieren

Ziel der Entwicklung des flexiblen Profilierens ist die Erweiterung der Formgebungsmöglichkeiten in einem Walzprofilierprozess. Neben der Herstellung von Bauteilfamilien mit unterschiedlichen Längen, aber konstanten Querschnitten sollen auch Profile mit in Längsachse veränderlichen Querschnitten herstellbar sein. Die Idee einer profiliertechnisch kontinuierlichen Erzeugung von Bauteilen mit einer Querschnittsveränderung ist schon seit den 1970er Jahren bekannt [P07]-[P09]. Die damals erarbeiteten Prinzipien konnten sich allerdings nicht bis zur Marktreife durchsetzen. In neueren Arbeiten wurde die Grundidee aufgegriffen, grundlegend überarbeitet und als Erfolg versprechend beurteilt [IST02], [GRO05].

Durch diese Weiterentwicklung des konventionellen Walzprofilierens, in der die Profiliergerüste über eine Motorik verfahren werden, ergibt sich ein zentraler Vorteil des Verfahrens hinsichtlich der Flexibilität, neue Profilgeometrien zu realisieren. Über die Flexibilität hinaus, Profile unterschiedlicher Länge mit demselben Werkzeugsystem zu fertigen, eröffnen sich weiterhin die Möglichkeiten, verschiedene Profilquerschnitte und Profilquerschnittsverläufe ohne Werkzeugwechsel darzustellen. Durch die Änderung der Verfahrenskontur der flexiblen Walzprofiliergerüste lassen sich, wie in [GUT10] gezeigt, Bauteilfamilien herstellen (vgl. Abbildung 2-5).

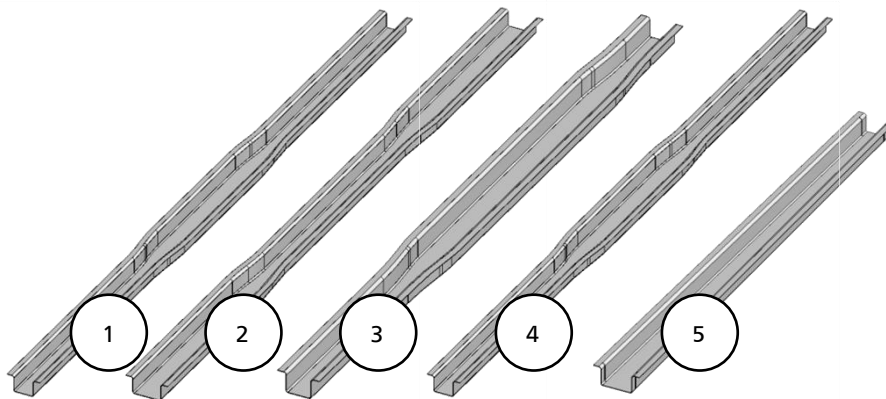


Abbildung 2-5: Bauteilfamilie eines Hut-Profils [GUT10]

Abbildung 2-5 zeigt die Möglichkeiten der Bauteilflexibilität anhand von fünf breitenveränderlichen Hut-Profilen. Nur mittels Änderung der Abschnittslänge und der Verfahrensbewegung der flexiblen Walzprofiliergerüste wurde das Basiszielbauteil (1) so verändert, dass eine Verjüngung im Mittenbereich des Profils (2), unterschiedliche Übergangsbereiche der Querschnittsänderung (3), unterschiedliche Profilbreiten des Ausgangsquerschnitts (4) oder auch konische Bauteile (5) ohne Werkzeugwechsel und Werkzeugjustage realisiert wurden. Um dies in einem kontinuierlichen Prozess abzubilden, ist eine für den flexiblen Walzprofilierprozess geeignete Prozesskette darzustellen. Vergleichbar mit dem konventionellen Walzprofilieren können die Bauteile in einem kontinuierlichen Prozess direkt vom Coil produziert werden (vgl. Abbildung 2-6). Hinzu kommt jedoch nach

der Bandvorbereitung mit Haspel und Bandrichtmaschine die Notwendigkeit, das Band zu besäumen, um am produzierten Fertigteil konstante Schenkel- bzw. Flanschhöhen zu erhalten. Um die Flexibilität des Verfahrens nutzen zu können, empfiehlt sich hierzu, ein Verfahren mit ähnlicher Flexibilität zu wählen. So bieten sich beispielsweise Laserschneiden [GUT10], Plasmaschneiden oder Rollmesser an. Diese Verfahren zum Besäumen können in eine zentrale Steuerung der gesamten flexiblen Walzprofilieranlage eingebunden werden und lassen sich somit mit den Verfahrensbewegungen der flexiblen Profiliergerüste synchronisieren [POK09]. Der Zuschnittsbereich sollte je nach Steuerungskonzept möglichst direkt mit der flexiblen Walzprofilierstrecke verbunden sein, da es sonst zu einem Versatz von Zuschnitts- und Verfahrenskontur der flexiblen Gerüste kommen kann.

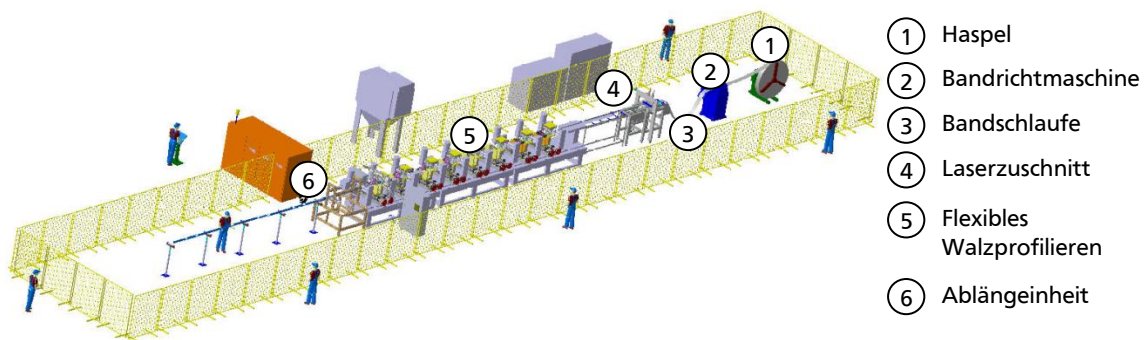


Abbildung 2-6: Layout der in PROFORM entwickelten flexiblen Walzprofilieranlage [LAR10]

2.1.3.1 Anlagenkonzepte für das flexible Walzprofilieren

Als grundlegend für den Erfolg des Verfahrens wurde ein Werkzeugkonzept entwickelt, welches die Position der Profilierrollen abhängig von der Profilform steuert. Die Position muss sich so einstellen, dass die Berührebene der Profilierrollen senkrecht auf dem einzuformenden Profilflansch steht. In [IST02] wurden die Grundlagen für Werkzeugkonzepte entwickelt und einander gegenübergestellt (vgl. Abbildung 2-7).

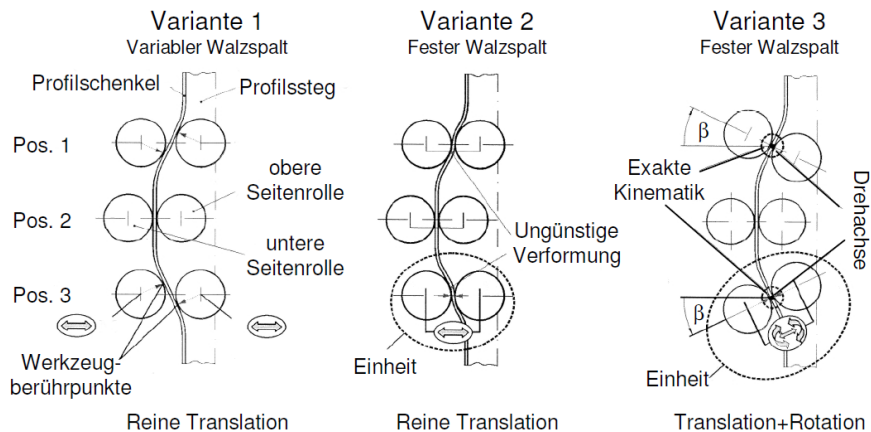


Abbildung 2-7: Rollenpositionen beim flexiblen Walzprofilieren [IST02]

Aus der Forderung nach einem festen Walzspalt an den Profilierrollen und einer senkrecht auf der eingeformten Bandkante stehenden Berührebene der Profilierrollen folgt die Notwendigkeit von translatorisch quer zur Profilerrichtung verfahrbaren und rotatorisch um die Hochachse schwenkbaren Profiliergerüsten. Diese Freiheitsgrade können durch serielle [ONA05] oder parallele ([P01], [LAR10], [P06], [BER11], [P02]) Kinematiken realisiert werden.

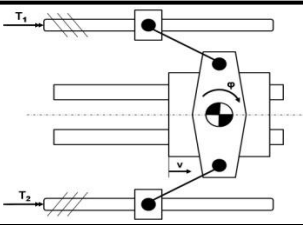
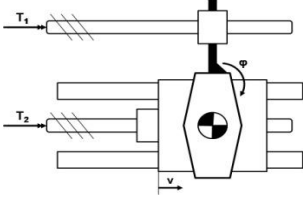
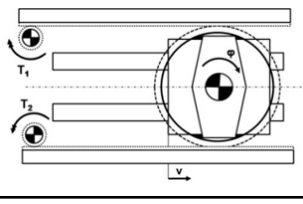
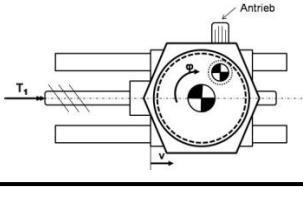
Prinzipielle Darstellung	Eigenschaften	Umgesetzt in
	<ul style="list-style-type: none"> Parallele Kinematik Symmetrischer Aufbau Antrieb über Spindeltriebe 	[P01] [LAR10] [P06]
	<ul style="list-style-type: none"> Parallele Kinematik Asymmetrischer Aufbau Antrieb über Spindeltriebe 	[IST02] [BER11]
	<ul style="list-style-type: none"> Parallele Kinematik Symmetrischer Aufbau Antrieb über Zahnstange 	[P02]
	<ul style="list-style-type: none"> Serielle Kinematik Symmetrischer Aufbau Antrieb über Spindeltrieb für Translation Antrieb über Schneckentrieb für Rotation 	[ONA05]

Tabelle 2-1: Derzeit in Forschungsanlagen umgesetzte Kinematiken flexibler Walzprofiliergeräte

Nach [NEU06] bieten parallelkinematische Maschinen eine Reihe von Vorteilen gegenüber seriellen Kinematiken. In der Regel kann bei parallelkinematischen Anlagen von einer höheren Steifigkeit ausgegangen werden als bei seriellen Aufbauten, da die Antriebe hier eine geschlossene kinematische Kette bilden und alle Antriebe nahe dem Arbeitspunkt der Anlage angreifen können. Darüber hinaus ergibt sich durch den Aufbau eine höhere Dynamik, da die bewegten Massen im Vergleich zum seriellen Aufbau geringer ausfallen. Allerdings ist im Regelfall das Verhältnis zwischen Bauraum und Arbeitsraum und die höhere Komplexität der Steuerung nachteilig zu bewerten [NEU06].

Neben den in Tabelle 2-1 aufgeführten Kinematiken existieren Forschungsanlagen zum flexiblen Walzprofilieren an der North China University of Technology ([YAN10], [BOQ11] und [WAN11]) und der University of Dalarna [LIN09a]. Letztere bietet neben breitenveränderlichen Hut-Profilen die Möglichkeit, höhenveränderliche Bauteile herzustellen. Im Rahmen von Untersuchungen auf dieser Anlage konnte eine gute Reproduzierbarkeit für verschiedene Hutprofiltypen mit höhen- und breitenveränderlichen Querschnitten nachgewiesen werden [LIN09a]. In [FAG09] wird eine 6-stufige Forschungsanlage zum flexiblen Walzprofilieren beschrieben. Jedes Profiliergerüst bietet vier Freiheitsgrade, um so neben breitenveränderlichen Profilen auch höhenveränderliche Profile herzustellen.

Höhenveränderliche Profile sind unter anderem in [ABE09] beschrieben. Es konnten am Beispiel eines Hutprofils die prinzipielle Herstellbarkeit mittels FEM Untersuchungen nachgewiesen werden.

Der Profilvertrieb beim flexiblen Walzprofilieren breitenveränderlicher Querschnitte kann entweder mittels angetriebener Profilierrollen an den flexiblen Gerüsten oder mittels konventioneller Walzprofiliergerüste zwischen den flexiblen Gerüsten realisiert werden. Bei der Verwendung von angetriebenen Profilierrollen an den flexiblen Gerüsten ist je nach Lage des Drehpunktes die Rotationsgeschwindigkeit anzupassen, um das Schwenken der Profiliergerüste bei nach außen verlagertem Drehpunkt zu kompensieren und einen konstanten Vorschub in der Anlage zu realisieren (Abbildung 2-8).

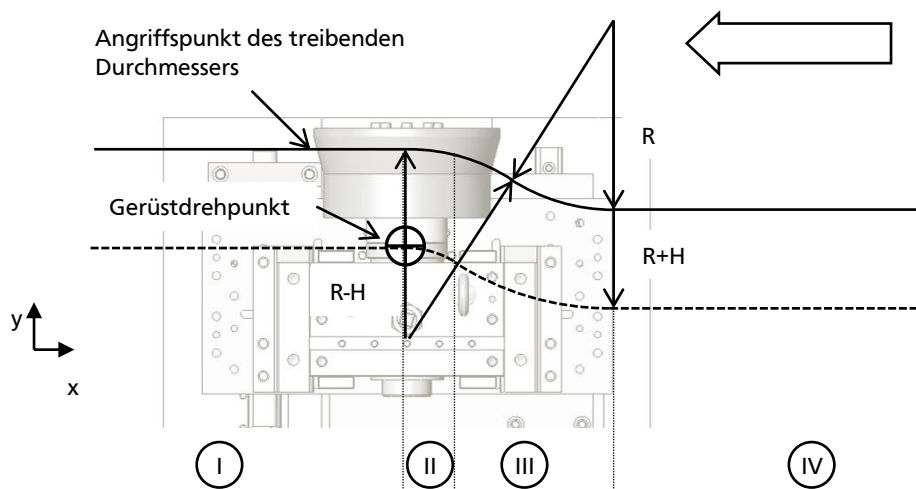


Abbildung 2-8: Nach außen versetzter Drehpunkt und Angriffspunkt des treibenden Durchmessers der Rollen am flexiblen Walzprofiliergerüst

Abbildung 2-8 zeigt den Pfad, den ein flexibles Walzprofiliergerüst beim Einformen eines breitenveränderlichen Profils relativ zum angetriebenen Blech folgt. Aufgrund der Folge der einzelnen Einformstufen in einer gesamten Anlage muss der Blechvorschub in der Anlage konstant sein. Andernfalls könnte es zu einem lokalen Aufstauen des Profils kommen. Bei einem nach außen versetzten Drehpunkt der flexiblen Profiliergerüste wie in Abbildung 2-8 sind der Angriffspunkt des treibenden Durchmessers und der Drehpunkt der flexiblen Gerüste nicht in einer Position. Unter der Annahme, dass sich der Angriffspunkt des treibenden Durchmessers im Übergangsbereich nicht ändert, kann der Abstand vom Drehpunkt des flexiblen Profiliergerüsts als konstant mit dem Hebelarm H angenommen werden. Der Drehpunkt des Profiliergerüsts kann als Bezugspunkt für den Vortrieb des Bleches in der Anlage genommen werden. Relativ zu diesem muss der Vortrieb des Bleches also konstant sein. Beim Profilieren der geraden Bereiche (I) und (IV) ergibt sich die Umfangsgeschwindigkeit der Rollen direkt aus dem treibenden Durchmesser und dem Blechvorschub. In den Übergangsbereichen (II) und (III) erfährt der Angriffspunkt des treibenden Durchmessers eine zusätzliche Verschiebung in oder entgegen der Profilerrichtung aufgrund des Schwenkens um den Gerüstdrehpunkt. Dies muss im Rollenantrieb

berücksichtigt werden, um einen konstanten Blechvorschub zu realisieren. Werden konventionelle Walzprofiliergerüste für den Antrieb des Bleches genutzt, kann auf eine Steuerung der Umfangsgeschwindigkeit an den flexiblen Profilierrollen verzichtet werden.

2.1.3.2 Spannungsmechanik und Verfahrensgrenzen beim flexiblen Walzprofilieren

Im Gegensatz zum konventionellen Walzprofilieren handelt es sich beim flexiblen Walzprofilieren nicht um ein reines Biegeverfahren. Aufgrund der Querschnittsänderungen entstehen Bereiche mit Formänderungen in Profillängsrichtung. Dies ist vergleichbar mit den Formänderungen, die beim Bördeln von Flanschen auftreten [SMI90].

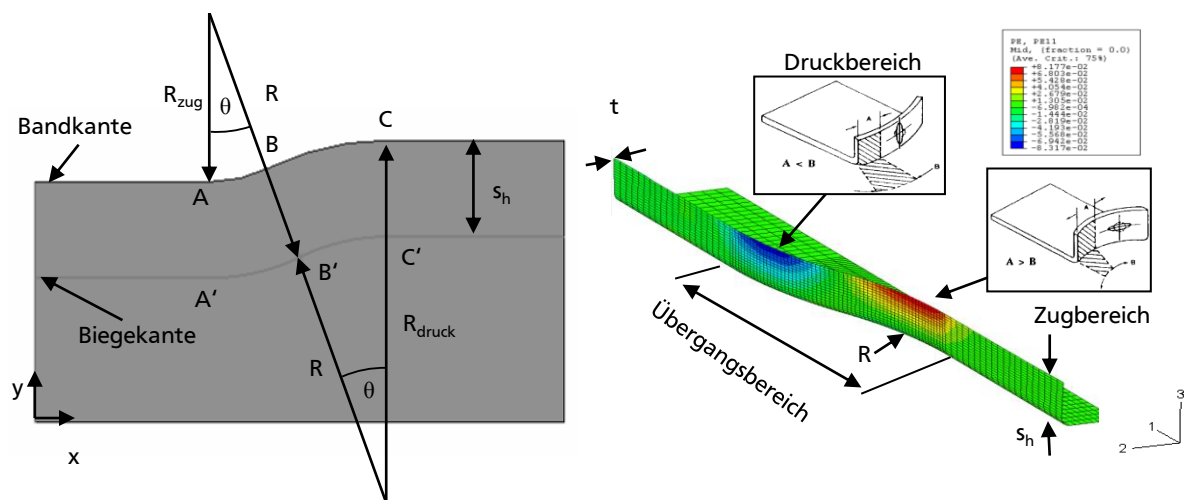


Abbildung 2-9: Platinenzuschnitt eines U-Profils und charakteristischer Zug- und Druckbereich an einem breitenveränderlichen U-Profil in der Finite Element Simulation nach [ZET07]

Für die Abbildung eines breitenveränderlichen U-Profils kommt beispielsweise der in Abbildung 2-9 abgebildete Platinenzuschnitt zum Einsatz. Am fertigen U-Profil muss nun die Bandkante des Zuschnitts auf der Biegekante abgebildet werden. Somit kommt es zur Abbildung des Zuschnittsradius R_{zug} bzw. R_{druck} auf dem Konturradius R . Hieraus folgt, dass die Strecke A-B gestreckt, wohingegen die Strecke B-C gestaucht werden muss. Somit ergeben sich die für das flexible Walzprofilieren charakteristischen Zug- und Druckbereiche mit Längsdehnungen in den Profilschenkeln (vgl. [ZET07]).

Aus den Spannungs- und Dehnungsverteilungen in den Übergangsbereichen können zusätzliche Verfahrensfehler gegenüber dem konventionellen Walzprofilieren folgen. So sind im Speziellen bei U-Profilen mit Breitenveränderung unter bestimmten Verfahrensparametern Falten im Druckbereich zu erkennen. Neben der Faltenbildung im Druckbereich kann es zu lokalen Verwölbungen im Profilboden kommen, da notwendige Längsdehnungen im Übergangsbereich nicht zufriedenstellend eingebracht werden können. Die Verwölbung des Profilbodens bildet sich als konkav im Zugbereich und als konvex im Druckbereich aus. Diese

lokale Formabweichung beinhaltet somit beide Richtungen einer Profilkrümmung in den Übergangsbereichen (Abbildung 2-10).

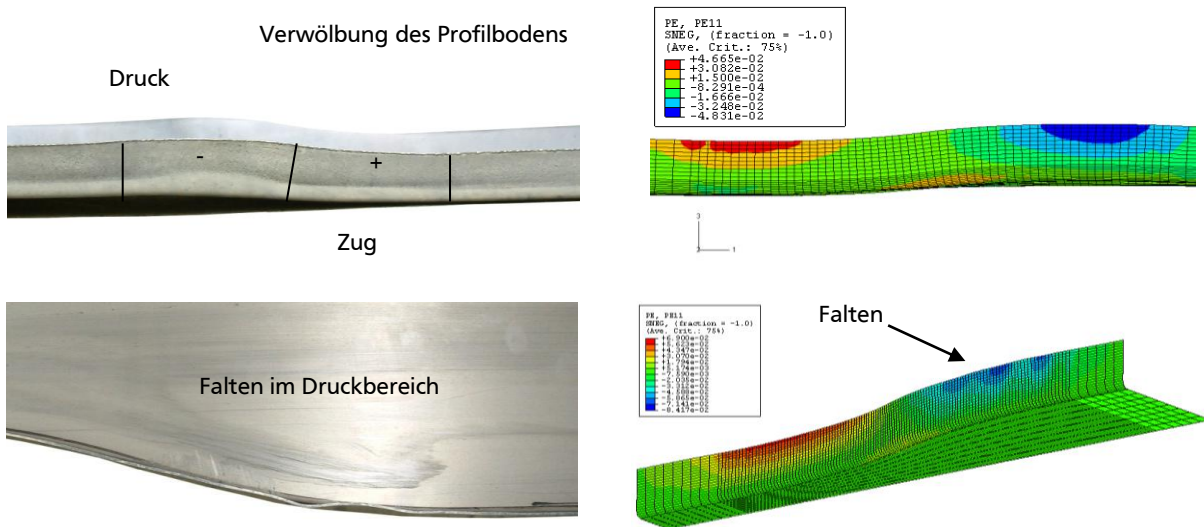


Abbildung 2-10: Versagensfälle beim flexiblen Walzprofilieren

Die Faltenbildung im Druckbereich wurde in [ZET07], [ONA08] und [GRO10] untersucht. In [ZET07] und [GRO10] wurde hierfür ein Auslegungsverfahren für flexibel profilierte U-Profile entwickelt, welches sich auf Ergebnisse aus Finite Element Simulationen und Prototypenversuchen stützt. Es konnte ein Zusammenhang zwischen der faltenfrei ertragbaren Spannung und der im Druckbereich des Profilschenkels herrschenden Spannung hergestellt werden. Hierdurch ist auf Basis von Materialdaten aus der Fließkurve und der geometrischen Profilparameter Schenkelhöhe s_h , Konturradius R , Zuschnittsradius R_{druck} und der Blechdicke t eine Abschätzung der faltenfreien Herstellbarkeit einer Profilgeometrie ohne FE Simulation möglich. Die für den Profilschenkel im Druckbereich ertragbaren Spannungen werden in [ZET07] nach

$$\sigma_{krit,el-pl} = k^* \cdot \frac{E}{1 - \nu^2} \frac{\pi^2 t^2}{12 b^2} \quad \text{Formel 2-3}$$

ermittelt. Der Beulfaktor k^* , als systembeschreibender Faktor, konnte empirisch aus Versuchsreihen in der FEM entwickelt werden. Es zeigt sich, dass speziell bei Profilen mit geringer Wandstärke und großer Flanschlänge die Neigung zum Beulen besonders groß ist. Im Rahmen der Auslegung wird diese beulkritische Spannung mit der im Profilschenkel herrschenden Spannung abgeglichen. Diese ergibt sich aus dem gemittelten herrschenden Umformgrad im Profilschenkel, wobei nach

$$\varphi_v = \kappa_v \cdot \varphi_{analytisch} = \kappa_v \cdot \left| \ln \frac{R}{R_{druck}} \right| \quad \text{Formel 2-4}$$

eine Interaktion zwischen Zug- und Druckbereich berücksichtigt wird. Hierbei wird der über die Membranspannung hergeleitete Umformgrad $\varphi_{\text{analytisch}}$ durch den empirisch ermittelten Scherfaktor κ_v reduziert. Die herrschenden Druckspannungen können im Folgenden über die Fließspannung abgeschätzt werden. Wird im Abgleich der herrschenden Druckspannung mit der ertragbaren Beulspannung diese überschritten, lässt sich das gewünschte Bauteil nicht faltenfrei herstellen. Entsprechend müssen für eine prozesssichere Herstellbarkeit entweder Geometrie- oder Werkstoffparameter angepasst werden.

[ONA08] und [ONA10] stellen zur Bewertung, ob ein U-Profil faltenfrei herstellbar ist, ein Verhältnis zwischen Schenkelhöhe s_h zu Blechdicke t auf, wobei bei einem Verhältnis unterhalb von 40 faltenfreie Flansche herstellbar sind [ONA08]. Zur Vermeidung von Falten im Druckbereich und der Verwölbung des Profilbodens schlägt [ONA10] lokales Auswalzen des Profils vor. Um die maximal wirkenden Druckspannungen zu reduzieren, wird der Profilboden im Druckbereich leicht ausgewalzt. Somit erfährt die Strecke entlang des Konturradius im Druckbereich eine Streckung, wodurch die Strecke B-C nicht so stark gestaucht werden muss. Durch ein gleichzeitiges Auswalzen der Flansche in Zugbereich konnte ferner die Verwölbung des Profilbodens reduziert werden [ONA10].

Weitere Strategien zur Optimierung der Profilbodenverwölbung sind in [ABE08] und [LAR10] aufgeführt. [ABE08] zeigen auf Basis von Simulationen an einem U-Profil, dass der Einsatz von Niederhaltern als Zusatzkomponenten in einer flexiblen Walzprofilieranlage zu einem Anstieg der Längsdehnungen im Zug- und Druckbereich und einer Reduktion der Bodenverwölbung im Übergangsbereich führt. Statische Niederhalter kommen als unterstützende Einheiten in [LAR10] zum Einsatz, wobei hier deren Einfluss auf die Profilgeometrie an hoch- und höchstfesten Stahlsorten im Versuch untersucht wurde. Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass die Verwölbung des Profilbodens mit der Materialfestigkeit ansteigt. Darüber hinaus zeigt sich die Tendenz, dass bei geringerer Blechdicke t die Verwölbung stärker ausfällt. Neben dieser Untersuchung konnte in [LAR10] eine Reduktion der Bodenverwölbung durch das lokale Erwärmen der Profilschenkel an einem Hut-Profil gezeigt werden. Mittels Wärmeeintrag in den Profilschenkeln wird die Festigkeit des Materials während der Eiformung herabgesenkt, wodurch es zu einer Reduktion der Bodenverwölbung kommt. Die Untersuchungen zeigen jedoch weiteren Optimierungsbedarf bei der Entwicklung von Erwärmungsstrategien und Niederhalterkonzepten [LAR10].

An breitenveränderlichen U-Profilen konnte neben möglicher Beulneigung im Druckbereich und der Verwölbung des Profilbodens eine Änderung der Schenkellänge im Übergangsbereich beobachtet werden [GÜL07], [ZET07]. [GÜL07] führte dies hauptsächlich auf die grobe Diskretisierung des Biegeradienbereiches in der Simulation zurück, wohingegen [ZET07] dies auch bei feinerer Diskretisierung und im Laborversuch beobachten konnte. Als Begründung hierfür wurden zwei Effekte herangezogen. Nach [ZET07] ergibt sich aufgrund der Kopplung der Längsdehnungen mit denen in Profilhöhenrichtung über die Querkontraktion die Verschiebung der Bandkante am flexibel profilierten Bauteil. Hieraus resultiert ein verkürzter

Profilschenkel im Zugbereich bzw. ein verlängerter Profilschenkel im Druckbereich. Neben diesem Effekt zeigte [VOG10], dass sich der Effekt des Absenkens der Bandkante im Zugbereich durch eine fehlerhafte Auslegung der Profilierrollen noch verstärken kann. Wird der Außenradius durch Seiten- und Unterrollen nicht abgestützt, kann dies zum Ausknicken des Biegeradius im Zugbereich unter den Spannungen in Profilhöhenrichtung resultieren. Abhilfe kann durch das Einbringen eines Radius an der Blechaußenseite geschaffen werden. Der Radius an der Unter- bzw. Seitenrolle ermöglicht durch die bessere Abstützung eine verbesserte Ausformung des Radius im Zugbereich. Eine enge Toleranz der Schenkelhöhen hat bei der Herstellung geschlossener Profile entscheidende Wichtigkeit. [VOG10] zeigt die Möglichkeit auf, an einem geschlossenen Profil mit veränderlichem Querschnitt als Vorform für das Innenhochdruckumformen den Schweißstoß mittels Anpassung des Zuschnitts vor dem flexiblen Walzprofilieren einzustellen. Hierdurch konnte in der Prozesskette bestehend aus flexiblem und konventionellem Walzprofilieren ein Profil hergestellt werden, welches mittels Laserschweißen zu einem geschlossenen Profil als IHU-Vorform bearbeitet werden konnte. Somit soll die Möglichkeit geschaffen werden, das Innenhochdruckumformen nur noch zur Kalibrierung des Bauteils einzusetzen und die Anforderungen an das Innenhochdruckumformen zu reduzieren.

3 Motivation, Lösungsansatz und Zielsetzung

Walzprofilierte Komponenten bieten hinsichtlich der Flexibilität des Verfahrens, der guten Materialausnutzung und des geringen Anlageninvests Vorteile gegenüber abbildenden Verfahren wie Tiefziehen und Innenhochdruckumformen [SWE03]. Die Flexibilität zeichnet sich durch die Möglichkeit aus, unterschiedliche Bauteillängen auf einer Anlage zu fertigen und das Verfahren mit anderen Fertigungsverfahren zu kombinieren. Allerdings sind mittels konventionellen Walzprofilierens nur konstante Querschnittsgeometrien darstellbar, wodurch der Einsatzbereich eingeschränkt wird. Flexibles Walzprofilieren bietet hier die Möglichkeit, die Vorteile des konventionellen Walzprofilierens mit einer gesteigerten Formenvielfalt zu kombinieren. Bauteilfamilien mit veränderlichen Bauteillängen und Bauteilquerschnitten sind so ohne Werkzeugwechsel nur mittels Variation der Werkzeugbewegung darstellbar, wodurch auch auf kleinere Losgrößen reagiert werden kann. Dieser Vorteil wird derzeit schon im Fassadenbau genutzt, wo Fassadenprofile in der Losgröße eins direkt auf der Baustelle gefertigt werden [DÖH06]. Als hauptsächlich beschränkender Faktor, der einen Einzug des Verfahrens in andere Industriezweige wie beispielsweise der Automobilindustrie behindert, ist der Vorbehalt hinsichtlich der Erreichbarkeit enger Toleranzfelder zu nennen.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen Strategien aufgezeigt werden, welche die Umformung positiv beeinflussen und die Herstellung hochqualitativer Bauteile mittels flexiblen Walzprofilierens ermöglichen. Hierbei werden drei Bereiche der Prozessauslegung betrachtet. Zum einen werden Strategien aus dem konventionellen Walzprofilieren betrachtet und der Einfluss von Profilblumenauslegung, anlagenspezifischen Parametern und Geometrie- und Werkstoffparametern auf die Geometrie des Fertigteils bewertet. Zum anderen werden die Umformung unterstützende Anlagenkomponenten entwickelt und untersucht, welche sich in passiv unterstützende und aktiv in den Prozess eingreifende Komponenten unterteilen lassen. Die drei untersuchten Strategiebereiche sollen unterschiedlich strenge Anforderungen an die Bauteilqualität berücksichtigen und lassen sich je nach Anforderung an das Zielbauteil miteinander kombinieren. Durch die Variation von Werkstoff- und Geometrieparametern soll die Notwendigkeit eingesetzter Strategien in der Konzeptphase des Anlagenlayouts bewertet werden.

Zur Abschätzung der Strategien wird die Verwölbung des Profilbodens an den untersuchten Bauteilen herangezogen. Abbildung 3-1 zeigt exemplarisch den Verlauf des Profilbodens ohne Niederhalter in der Profilhöhenrichtung entlang der Symmetrieebene. Erkennbar sind hierbei die Aufweitung des Profils im Übergangsbereich (I) und die Verjüngung im Übergangsbereich (II). In diesen Bereichen erfährt das Profil lokale Verwölbungen, welche im vorliegenden Fall in der Aufweitung 3,7 mm und in der Verjüngung 3,8 mm betragen. Diese lokalen

Formabweichungen gilt es mittels der im Folgenden beschriebenen Strategien zu minimieren, um so Bauteile höherer geometrischer Güte herzustellen.

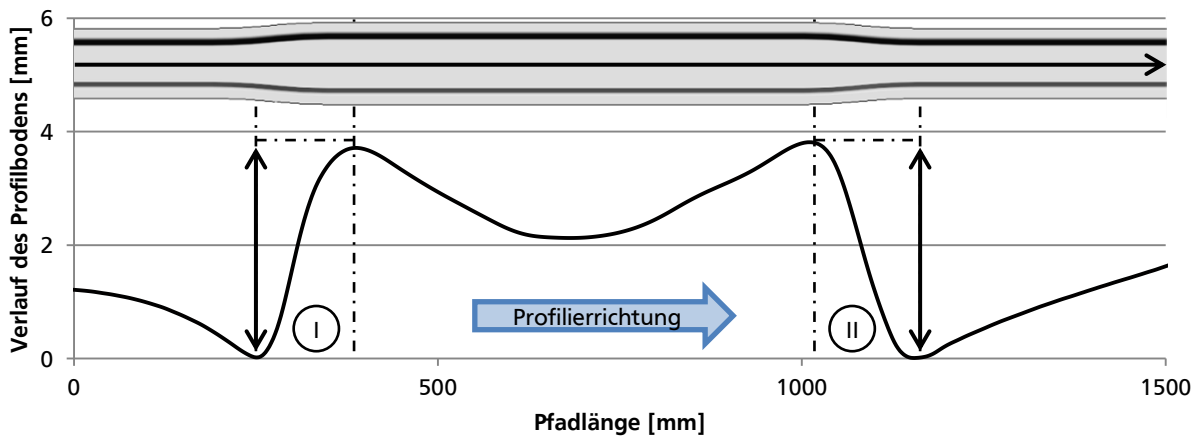


Abbildung 3-1: Bodenverwölbung in den Übergangsbereichen eines flexibel profilierten Hutprofils

Als Untersuchungsmethoden kommen Finite Elemente Simulationen und Versuche auf der Versuchsanlage des PtU zum Einsatz. Jedoch erweist sich die Simulation von Walzprofilierprozessen mittels FEM als sehr rechenzeitintensiv. Grund hierfür liegt unter anderem in der großen Anzahl an Kontaktpaaren im Simulationsprozess. Um die Rechenzeit für die Simulationen zu reduzieren, wird daher im Rahmen der Arbeit neben den inhaltlichen Untersuchungen ein Simulationsmodell für das flexible Walzprofilieren entwickelt. Mittels Simulationen werden anschließend Sensitivitätsanalysen durchgeführt und ausgewählte Parameter in Laborversuchen untersucht.

4 Finite Elemente Simulation für die Untersuchungen

Die Finite Elemente Methode ist ein weit verbreitetes Werkzeug in der Produktionstechnik. Sie wird vielfältig eingesetzt, um zum einen die Herstellbarkeit in der Umformtechnik zu überprüfen und zum anderen das Prozessverständnis zu verbessern. In aktueller Literatur zum Walzprofilieren liegt der Fokus der entwickelten Simulationsmodelle neben der Betrachtung von Technologieeinflüssen auch auf der Verringerung der Rechenzeit.

4.1 Modellentwicklung

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit soll im Folgenden ein Simulationsmodell zur Beschreibung des flexiblen Walzprofilierens entwickelt werden. Die Herausforderung bei der Simulation von Walzprofilierprozessen liegt zu einem großen Teil in der hohen Anzahl an Werkzeugkontakten und den unterschiedlichen Anforderungen an die Vernetzung des Bauteils, da die hauptsächlichen Umformprozesse quer zum Vortrieb des Halbzeuges stattfinden, wohingegen die hauptsächliche Ausdehnung des Halbzeugs in der Profilrichtung liegt.

4.1.1 Nichtlineare Finite Elemente Methoden

Umformsimulationen sind im Allgemeinen nichtlineare Finite Elemente Simulationen. Es existieren in der FEM drei Arten der Nichtlinearität: nichtlineare Geometrie, nichtlineares Materialverhalten (Plastizität) und Kontakt [BAT02]. Diese Nichtlinearitäten führen dazu, dass die Rechenzeiten gegenüber linearen Modellen deutlich höher liegen. Zur Lösung nichtlinearer Finite Elemente Simulationen existieren verschiedene explizite und implizite Lösungsalgorithmen. Abaqus bietet für den Bereich der Umformtechnik sowohl explizite als auch implizite Verfahren an.

Sehr gut für die Lösung großer nichtlinearer Probleme sind explizite Methoden geeignet [ABQ610]. Speziell bei einer Vielzahl von Kontakten liegen diese gegenüber impliziten Verfahren im Vorteil, da Kontaktprobleme in expliziten Verfahren in der Regel robuster und einfacher zu lösen sind [CHU98]. Bei der expliziten Zeitintegration ist der Rechenaufwand pro Inkrement gering. Das Ergebnis zum Zeitpunkt t_{n+1} hängt hierbei nur von den Größen zum Zeitpunkt t_n ab [WRI01]. Somit muss das Gesamtsystem bei der Ermittlung der Lösung nicht im Arbeitsspeicher gehalten werden. Die Größe der Zeitschritte bei expliziten Verfahren ist jedoch beschränkt durch die Eigenfrequenz des Systems und kann sehr klein werden, wodurch die Anzahl der Inkremente unter Umständen sehr groß ist. Um ein stabiles Gleichungssystem zu erhalten, muss der Zeitschritt kleiner als der kleinste kritische Zeitschritt sein. Dieser ergibt sich nach [BAT02] zu:

$$\Delta t = \frac{L_e}{c}$$

Formel 4-1

Hier ist L_e die charakteristische Elementkantenlänge und c die aktuelle Wellenausbreitungsgeschwindigkeit. Hieraus folgt, dass kleine Elemente im Simulationsmodell die Rechenzeit deutlich erhöhen können. Weiterhin eignen sich explizite Verfahren nur bedingt zur Abbildung von Rückfederungseffekten. Zwischen den einzelnen Umformstufen beim Walzprofilieren treten diese jedoch aufgrund der wechselnden Kontaktbedingungen auf. Hierdurch wird die Effizienz expliziter Verfahren wiederum deutlich reduziert, da das Lösen des Kontaktes möglichst in einem langsamen Prozess erfolgen muss [ABQ610].

Zur Berechnung statischer impliziter Probleme muss im Allgemeinen ein nichtlineares algebraisches Gleichungssystem

$$F^N(u^M) = 0$$

Formel 4-2

gelöst werden [WRI01]. Zur Lösung dieses Gleichungssystems nutzt Abaqus/Standard das Newton Raphson Verfahren und das Quasi Newton Verfahren. In beiden Fällen muss die Gesamtsteifigkeitsmatrix für jede Iteration neu gebildet werden. Hierdurch ist bei den Verfahren insbesondere bei großen Problemstellungen ein deutlicher Bedarf an Speicherplatz notwendig. Dies beeinflusst die Rechenzeit in großem Maße negativ. Allerdings ist die Methode auch stabil für verhältnismäßig große Zeitschritte.

[HAM08] vergleichen verschiedene Ansätze zur Simulation von Walzprofilierprozessen. Hierbei kommen explizite und implizite Lösungsalgorithmen zum Einsatz. Verglichen wurden explizit statische und dynamische Ansätze wie auch implizit dynamische und statische Gleichungslöser. Hierbei kamen die Programme Marc (implizit dynamisch und statisch), LS-DYNA (explizit dynamisch) und STAMP3D (explizit statisch) zum Einsatz. Die Simulationsergebnisse konnten mit Profilierversuchen verglichen werden. Die Untersuchung zeigt, dass zur Abbildung des Walzprofilierens die impliziten Gleichungslöser bessere Übereinstimmung mit den Realversuchen vorweisen. Gerade bei der Ermittlung der finalen Bauteilgeometrie können realitätsgetreue Ergebnisse generiert werden [HAM08].

Für die folgenden Untersuchungen wird als Solver Abaqus/Standard verwendet, da mittels impliziten Verfahren Rückfederungseffekte besser abgebildet werden und sich somit genauere Aussagen hinsichtlich der Bauteilgeometrie treffen lassen.

4.1.2 Elementformulierungen

Neben der zeitlichen Diskretisierung ist vor allem auch die örtliche Diskretisierung ausschlaggebend für die Ergebnisgüte einer Simulation. Hierbei sind zum einen die Feinheit der Vernetzung und zum anderen die Art der verwendeten finiten Elemente zu berücksichtigen [BAT02].

In kommerziellen FEM Programmen stehen eine Vielzahl von Hex-Elemente in Form von Solid- und Schalen-Elementen zur Verfügung. Sehr gut geeignet für die Abbildung von Biegeproblemen sind Schalen-Elemente, da diese eine Diskretisierung mit einem Element über der Blechdickenrichtung zulassen. Im Rahmen von [RÖC08] hat sich das Finden von Kontakt jedoch bei diesem Elementtyp als schwierig herausgestellt. Hier wird in MARC eine Kombination aus Solid- und Schalen-Elementen mit einem Element über der Blechdicke vorgeschlagen, wobei Schalen-Elemente des Typs 185 mit 13 Integrationspunkten im Radienbereich und Solid-Elemente des Typs 7 mit linearer Ansatzfunktion in den Profilschenkeln eingesetzt werden. Mittels dieser Kombination werden Kontakte in den Profilschenkeln robuster gefunden, wobei gleichzeitig auf eine Diskretisierung mit einem Element über der Blechdicke durch die Verwendung von Schalenelementen zurückgegriffen werden kann. Durch Anwendung dieser Methode kann die Rechenzeit gegenüber einem Simulationsmodell mit reiner Vernetzung mit Solid-Elementen des Typs 7 reduziert werden, da hier zur Abbildung der Biegung im Radius in der vorgeschlagenen Idealkonfiguration 5 Elemente über der Blechdicke verwendet werden müssen [RÖC08].

Die Identifikation eines geeigneten Elementtyps wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit anhand der Einförmung eines konventionellen Hut-Profils mit dem Rollensatz der flexiblen Walzprofilieranlage des PtU vorgenommen (vgl. Abbildung 5-4). Verwendung finden Solid-Elemente mit einer entlang der Profilquerrichtung konstanten Anzahl von Elementen über der Blechdicke. Vergleichbar mit dem Element des Typs 7 in MARC ist in Abaqus der Elementtyp C3D8, einem vollintegrierten 8 Knoten 3D Element. Zur Abbildung von Biegebeanspruchungen muss von diesem Elementtyp eine höhere Anzahl von Elementen über der Blechdicke verwendet werden, da dieser Elementtyp zu shear locking tendiert und somit übersteif auf Biegung reagiert [ABQ610]. Um dem entgegenzuwirken, bietet Abaqus die Verwendung des Elementtyps C3D8I an, bei dem die Elemente trotz ihres Typs erster Ordnung eine mit angrenzenden Elementen inkompatible Formfunktion besitzen [BAT02], [ABQ610]. Dieser Elementtyp ist vergleichbar mit der Assumed Strain Formulierung in MARC [MAR10]. Neben diesem Ansatz können Elemente höherer Ordnung Verwendung finden, wobei hier erhöhter Speicherbedarf und Rechenzeit zu erwarten sind. Jedoch kann dem wiederum mit reduzierter Elementanzahl entgegengewirkt werden. Somit kommen im Rahmen der Untersuchung auch Elemente des Typs C3D20 mit quadratischer Ansatzfunktion zum Einsatz. Gegenüber diesen vollintegrierten Elementen bietet Abaqus noch die Verwendung reduziert integrierter Hex-Elemente an (C3D8R bzw. C3D20R). Hierbei werden weniger Gausspunkte gegenüber vollintegrierten Elementen verwendet. Diese Elementtypen erweisen sich im Regelfall als sehr effizient und speicherplatzsparend, wobei sie in der Regel stabilisiert werden müssen. Dies wirkt sich unter Umständen als nachteilig aus, da die Lösung des Problems dann häufig von den Stabilisierungsparametern abhängig ist [WRI01].

Die Vernetzung wurde im Rahmen der Parameterstudie ausgehend von Ergebnissen von [RÖC08] gestartet. Zur Abbildung der Biegeradien werden acht Elemente entlang des Umfangs verwendet und fünf Elemente über der Blechdicke. Aufgrund der erweiterten

Elementformulierungen im Vergleich zu [RÖC08] wird dies als Maximalkonfiguration herangezogen.

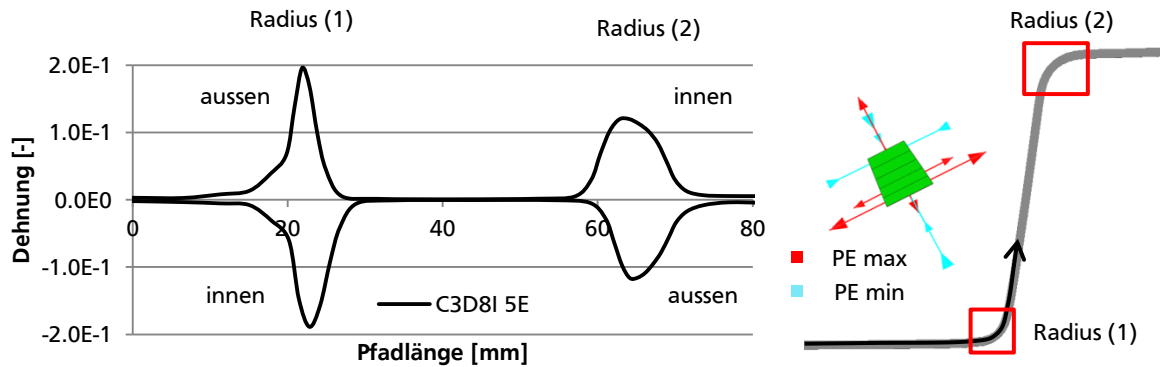


Abbildung 4-1: Haupt- und Nebenformänderung am Profilquerschnitt mit fünf C3D8I Elementen über der Blechdicke

Abbildung 4-1 zeigt exemplarisch für den Profilquerschnitt den Verlauf von Haupt- und Nebenformänderung entlang eines Pfades quer zur Profilierrichtung an der Innen- und Außenseite. Am Biegeradius 1 zwischen Profilboden und Schenkel mit $R_1=3$ mm tritt an der Innenseite die Hauptformänderung in Blechdickenrichtung auf, wohingegen die Nebenformänderung das Stauchen der inneren Faser repräsentiert. Die Dehnung der Außenfaser tritt dementsprechend als Hauptformänderung entlang des Pfades an der Profilaußenseite auf. Aufgrund der umgekehrten Biegerichtung am Radius 2 mit $R_2=5$ mm tritt hier die Hauptformänderung in Blechebenenrichtung an der Innenseite und somit dem Zugbereich auf. Die für die Bewertung der Biegung ausschlaggebende Stauchung zeigt sich an der Profilaußenseite als Nebenformänderung. Nachfolgend zeigt Abbildung 4-2 die Gegenüberstellung der verschiedenen untersuchten Elementtypen.

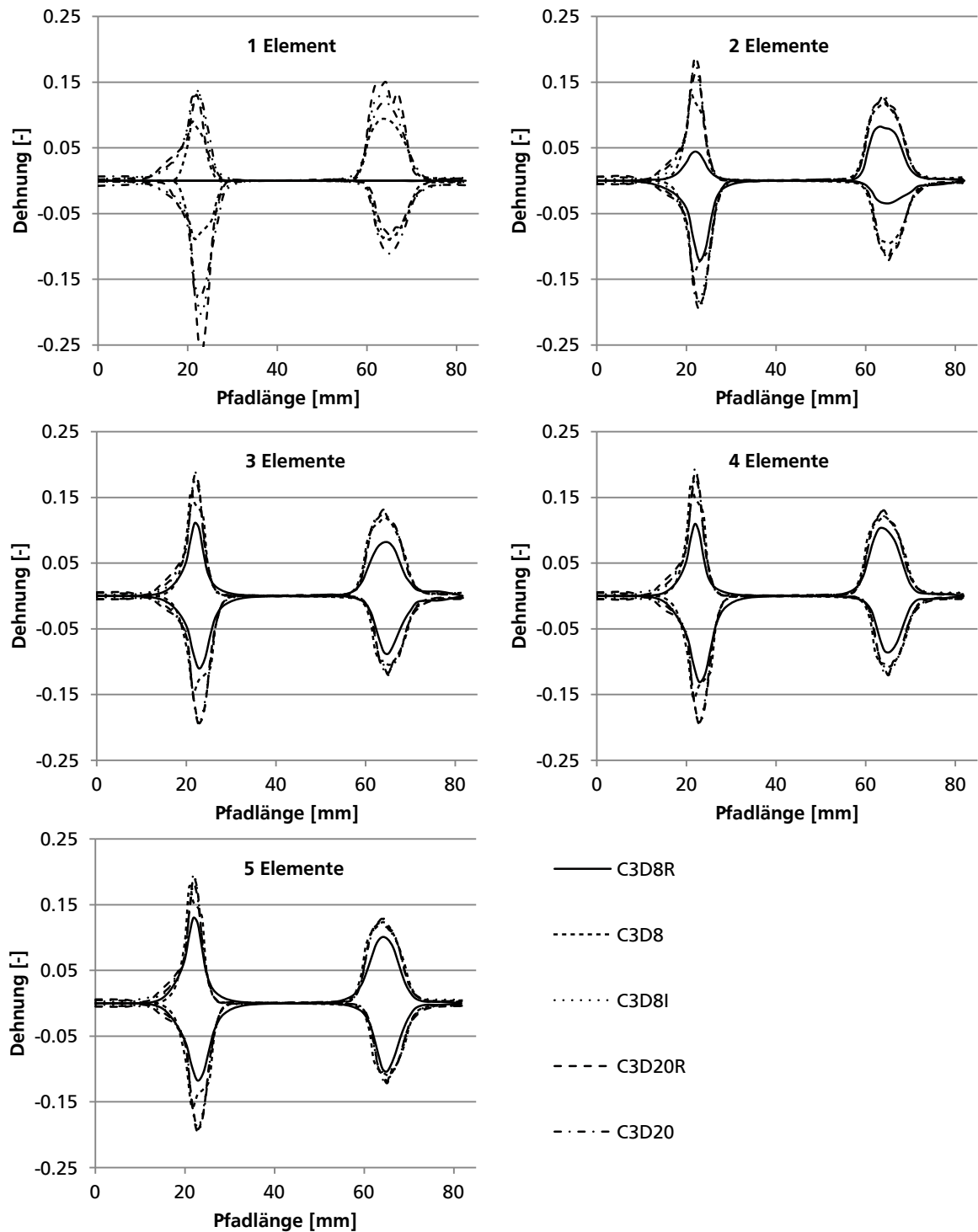


Abbildung 4-2: Hauptformänderung und Nebenformänderung am Profilquerschnitt für verschiedene Elementtypen

Es zeigt sich, dass Elemente mit einfachem linearen Ansatz (C3D8) und linearem reduziert integrierten Ansatz (C3D8R) tendenziell steifer auf Biegung reagieren als die Elemente mit linearem Ansatz und inkompatiblen Moden oder Elemente mit quadratischer Ansatzfunktion. Allen Elementansätzen ist im vorliegenden Fall jedoch gemein, dass mindestens zwei Elemente über der Blechdicke benötigt werden, um zu konvergieren. Speziell am Radius zwischen Profilboden und Schenkel zeigt die Verwendung von Elementen des Typs C3D8 und C3D8R mit 3 Elementen noch keine Konvergenz. Die Hauptformänderungen steigen bei steigender Elementanzahl weiterhin an. Gegenüber den erweiterten Ansätzen der Formfunktion zeigen die Elemente mit rein linearem Ansatz ein zu steifes Verhalten hinsichtlich Biegung, was sich auch mit Untersuchungen zum Biegeverhalten in [ABQ610] deckt. Bei der Verwendung von Elementen mit quadratischer Ansatzfunktion wie C3D20 oder Elementen vom Typ C3D8I mit inkompatiblen Moden zeigt sich, dass bei der Verwendung von zwei Elementen des Typs C3D8I wie auch bei C3D20 ein konvergierendes Verhalten hinsichtlich der Haupt- und Nebenformänderung eintritt.

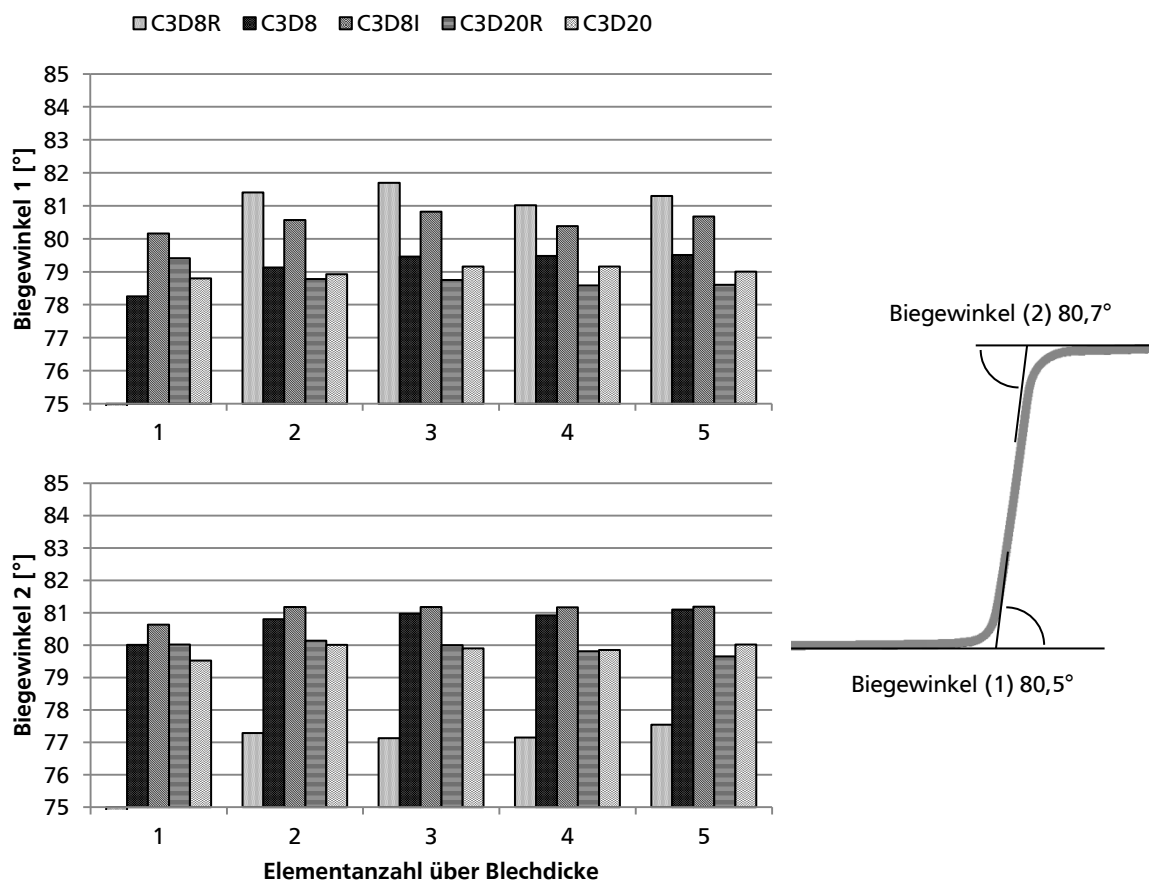


Abbildung 4-3: Biegewinkel in der Simulation für verschiedene Elementtypen (links) und gemessene Biegewinkel am Versuchsbauteil (rechts)

Bei der Betrachtung der simulierten Biegewinkel fällt auf, dass die Verwendung des Elementtyps C3D8 gegenüber dem Ansatz C3D8I tendenziell zu geringeren Biegewinkeln neigt, also ein biegesteiferes Verhalten aufzeigt (Abbildung 4-3). Es tritt zwar bei drei Elementen über der Blechdicke ein konvergierendes Verhalten auf, die Werte sind jedoch bei gleicher Elementanzahl quer zum Profil geringer als beim Elementtyp C3D8I. Dies lässt darauf schließen, dass die Anzahl der Elemente im Biegeradiusbereich (1) noch nicht ausreichend ist, um das Simulationsproblem hinreichend genau abbilden zu können. Beim Elementtyp C3D8I zeigt sich im Gegensatz hierzu bereits ein konvergierendes Verhalten bei zwei Elementen über der Blechdicke, eine weitere Netzverfeinerung erscheint als nicht notwendig. Die Elemente mit quadratischem Ansatz liefern im vorliegenden Fall tendenziell höhere Rückfederungswerte.

Zum Abgleich der Elementvariation wurden auf der Prototypenanlage zum flexiblen Walzprofilieren am PtU Referenzversuche an einem Hutprofil mit dem in Abbildung 5-1 dargestellten Querschnittsabmessungen unternommen. Die Versuche beschränkten sich hierbei jedoch auf die Einformung eines geraden Hutprofils, ohne veränderlichen Querschnitt. Am Versuchsbauteil wurden die Haupt- und Nebenformänderungen am Profilquerschnitt mittels des optischen Messsystems GOM ARGUS untersucht und die profilierten Biegewinkel mittels Winkellehre aufgenommen. Die nach dem Versuch gemessenen Biegewinkel betragen am Biegeradius 1 zwischen Boden und Profilschenkel $80,5^\circ$ und am Biegeradius 2 zwischen Profilschenkel und Profilflansch $80,7^\circ$. Zur Ermittlung der Dehnungen wird vor dem Profilieren mittels chemischen Ätzens ein Punkteraster auf das Blech aufgebracht. Während der Umformung folgen die einzelnen Punkte den Dehnungen auf der Oberfläche und können anschließend mittels Kamera aufgenommen werden. Hieraus ist die Ermittlung von Haupt- und Nebenformänderung möglich, eine Bestimmung der Blechdickenänderung kann aus der Volumenkonstanz gefolgert werden (vgl. Formel 4-3). Somit kommen zur Charakterisierung die in der Blechebene wirkenden Formänderungen φ_1 und φ_2 in Betracht. Aus der Volumenkonstanz ergibt sich die Formänderung in Blechdickenrichtung φ_3 nach:

$$\varphi_3 = -\varphi_1 - \varphi_2 \quad \text{Formel 4-3}$$

Abbildung 4-4 zeigt den Abgleich zwischen dem mittels GOM ARGUS vermessenen Dehnungsverlaufs im Profilquerschnitt im Vergleich zu den in der Simulation mit zwei Elementen des Typs C3D8I ermittelten Haupt- und Nebenformänderungen. Die Verläufe zeigen hierfür eine gute Übereinstimmung der Haupt- und Nebenformänderungen.

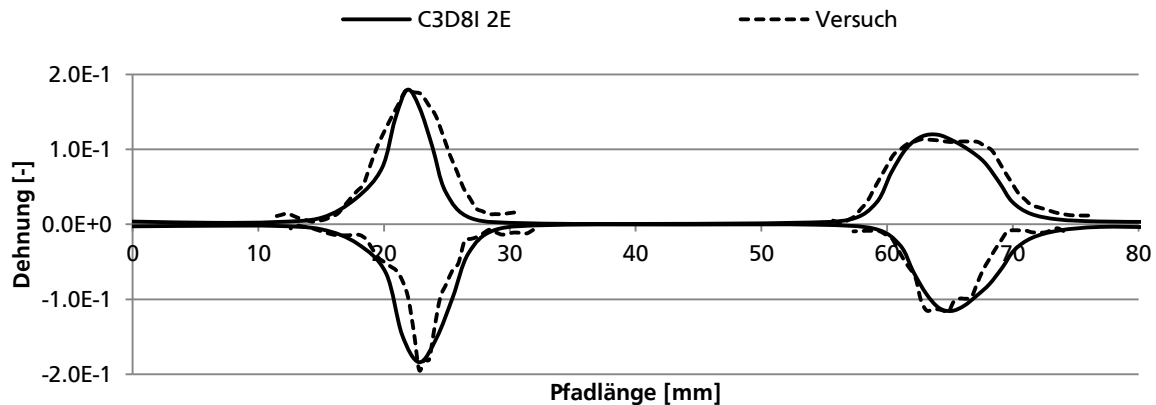


Abbildung 4-4: Hauptformänderung und Nebenformänderung am Profilquerschnitt für Versuch und Elementtyp C3D8I mit 2 Elementen über der Blechdicke

Unter Berücksichtigung der ermittelten Rechenzeiten aus der Elementvalidierung erscheint der Elementtyp C3D8I mit zwei Elementen über der Blechdicke als geeignet für die Abbildung des Profilvorgangs mittels Simulation. Abbildung 4-5 zeigt die normierte Rechenzeit der einzelnen Simulationen der Elementvariation. Die Rechenzeiten sind auf die Simulation mit einem Element über der Blechdicke mit dem Ansatz C3D8R bezogen. Hier zeigt sich, dass die Elemente mit quadratischem Ansatz für diese Simulation hinsichtlich der Rechenzeit deutlich im Nachteil gegenüber linearen Elementansätzen sind. Weiterhin zeigt sich jedoch auch, dass trotz des erweiterten Ansatzes der Elemente C3D8I im Vergleich zu C3D8 Rechenzeit eingespart werden kann, da für die Abbildung des Biegeproblems nur zwei Elemente über der Blechdicke benötigt werden. Im Gegensatz hierzu müssen vier Elementen vom Typ C3D8 zum Einsatz kommen. Hieraus folgt eine Rechenzeit vom Faktor 1,28 gegenüber 1,5.

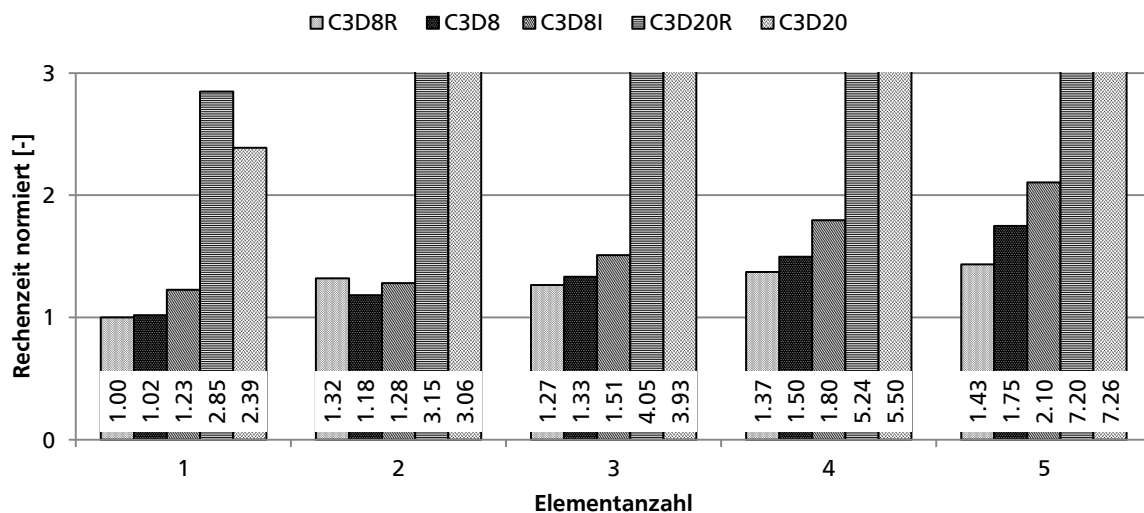


Abbildung 4-5: Rechenzeit bei der Verwendung verschiedener Elementtypen und unterschiedlicher Elementanzahl über der Blechdicke

4.1.3 FEM Modell für die Untersuchungen

Wie unter 4.1.1 beschrieben hängt die Rechenzeit bei impliziten Modellen aufgrund des Arbeitsspeicherbedarfs stark von der Größe des Gesamtsystems ab. Weiterhin verlangsamt Nichtlinearität des Problems die Lösung. Hierzu zählen neben nichtlinearem Materialverhalten und nichtlinearer Geometrie Kontakte im Simulationsmodell [WRI01].

Abaqus bietet die Möglichkeit, Kontakte zu aktivieren bzw. zu deaktivieren. Hierdurch kann Rechenzeit eingespart werden [ABQ610]. Das Gesamtmodell beinhaltet jedoch immer noch alle Bauteile, wodurch die Systemmatrix des Gesamtmodells weiterhin groß ist. Da beim Walzprofilieren die im Einsatz befindlichen Kontaktkörper bei der Simulation mit einem Platinezuschnitt jedoch nur über eine verhältnismäßig kurze Zeit im Einsatz sind, soll zur weiteren Optimierung des Speicherbedarfs und der Rechenzeit eine Aufteilung des Gesamtproblems in Einzelprobleme durchgeführt werden. Dies bedeutet, dass nicht die gesamte flexible Profilierstrecke mit allen Werkzeugen in einem Modell abgebildet, sondern jede Umformstufe als Einzelrechnung aufgefasst wird. Das Werkzeugsystem beinhaltet hierbei jeweils zwei Antriebsgerüste und ein flexibles Umformgerüst, jeweils mit Ober- und Unterrolle. Das umgeformte Profil der Rechnung i wird anschließend als „Initial State“ in die Folgerechnung $i+1$ importiert (vgl. Abbildung 4-6). Vorteilhaft bei dieser Methode ist darüber hinaus die einfache Möglichkeit, Zwischenergebnisse auszuwerten und somit beispielsweise die Entwicklung der Bodenverwölbung von Stufe zu Stufe zu bewerten.

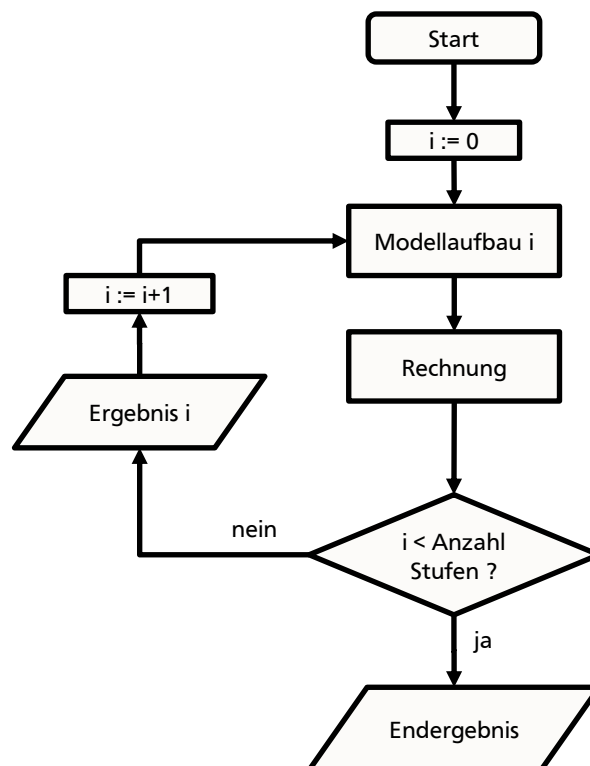


Abbildung 4-6: Ablaufdiagramm der Simulationsmodelle

Als Abgleich dieser Strategie wird der Vergleich mit einem Referenzmodell herangezogen. Als Referenz dient eine komplette flexible Walzprofilierstrecke zur Einformung eines Hutprofils in einer 5-stufigen Winkelfolge von 15°/30°/50°/70°/80. Diese Winkelstufe entspricht der des in den weiteren Untersuchungen betrachteten Hutprofils aus Abbildung 5-1. Betrachtet werden sowohl die Aufweitung als auch die Verjüngung des Profilquerschnittes mit einem Konturradius von jeweils 500 mm. Hierbei ändert sich die Profildbreite einseitig um jeweils 10 mm.

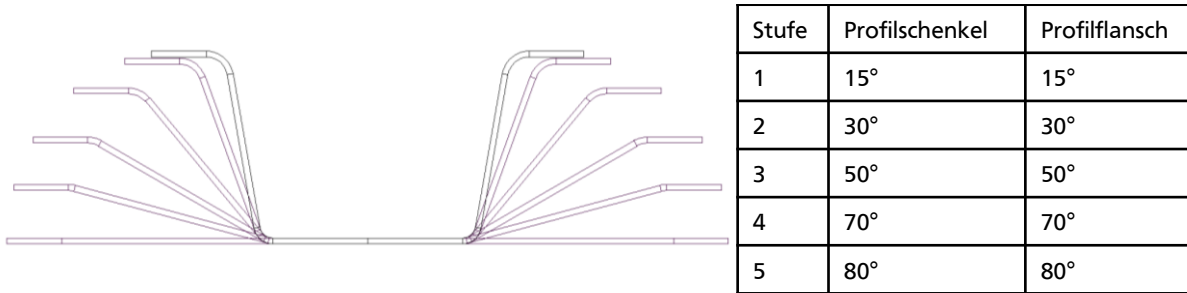


Abbildung 4-7: Profilblume der Referenzsimulation

Das Simulationsmodell beinhaltet zur Einformung des breitenveränderlichen Hutprofils neben den einformenden flexiblen Profiliergerüsten noch konventionelle Gerüste, welche den Antrieb des Profils im Realversuch bereitstellen. Die Werkzeuge in der Simulation werden als analytische Starrkörper modelliert. In der Referenzsimulation ergibt sich für die gesamte Einformstrecke eine Gesamtzahl von 22 Werkzeugen, bestehend aus fünf flexiblen und sechs konventionellen Profilierstufen mit Ober- und Unterrolle. Die Kontakte sind nach Empfehlungen in [ABQ610] nur sequentiell aktiviert, um die Rechenzeit zu reduzieren.

Bei der Referenzsimulation ergibt sich aufgrund der Antriebsgerüste in der Anlage zwischen den Umformstufen ein Gerüstabstand von 1000 mm zwischen den Umformstufen. Nach [BHA84] berechnet sich die Einformlänge L nach Formel 2-1. Hieraus ergibt sich bei der verwendeten Winkelfolge eine maximale Einformlänge von 250 mm. Ein Einfluss der einzelnen Umformstufen kann demnach vernachlässigt werden und das Umformergebnis kann nach Abbildung 4-6 ermittelt werden. Für jede Umformsufe wird hiernach ein einzelnes Simulationsmodell erstellt. Der Werkzeugsatz pro Umformstufe enthält dabei die verfahrbaren Einformrollen und die Antriebsgerüste. Somit ergibt sich eine Anzahl von sechs Werkzeugkontakten und sieben Körpern in der Einzelsimulation. Nach erfolgreicher Berechnung der Umformstufe dient das Ergebnis des umgeformten Profils als Eingangsgröße für die folgende Simulation. Diese Vereinfachung ergibt ein kleineres Berechnungsproblem, da programmintern für die Werkzeuge Kontaktelemente generiert werden müssen. Bei der Referenzsimulation ergeben sich somit 973552 Elemente, von denen das Blech mit 21634 Elementen diskretisiert ist. Mittels Abbildung der Simulation in einer Schleife aus Einzelrechnungen nach Abbildung 4-6 ergeben sich in Stufe zwei beispielsweise lediglich 281248 Elemente. Im Gegensatz zu Abaqus/Explizit, wo die Rechenzeit nahezu linear mit der Problemgröße ansteigt, geschieht dies bei statisch impliziter Berechnung überproportional

[ABQ610]. Daraus folgt entsprechend bei den kleineren Einzelrechnungen eine Reduktion der Gesamtrechnenzeit trotz erhöhtem Aufwand durch den Transfer der Daten von Umformstufe zu Umformstufe. Im vorliegenden Beispiel der Einförmung des breitenveränderlichen Hut-Profils mit Antriebsrollen und flexibel verfahrbaren Umformrollen ergibt sich eine 38% höhere Wallclocktime¹ bei der Referenzsimulation.

Abbildung 4-8 zeigt den Vergleich des Verlaufs des Profilbodens zwischen der Referenzsimulation und der Jobschleife nach Abbildung 4-6. Die Modelle zeigen prinzipiell einen vergleichbaren Verlauf des Profilbodens an der Symmetrieachse. Allerdings ist auch feststellbar, dass der Verlauf des Modells mit Jobschleife eine größere Längskrümmung gegenüber der Referenzsimulation aufweist. Dies ist dadurch zu begründen, dass im Vergleich zur Referenzsimulation mehr Antriebsrollen im Einsatz sind, da jede Umformstufe zwei Antriebsgerüste beinhaltet. Hieraus ergibt sich bei den fünf Umformstufen der gesamten Simulation eine Anzahl von zehn Antriebsgerüsten, wohingegen die Referenzsimulation nur sechs Antriebsgerüste beinhaltet. Diese walzen den Profilboden aufgrund ihrer Zustellung leicht aus, wodurch es zu einer Längung des Profilbodens kommt. Wie jedoch nachfolgend in 4.1.4 beschrieben, ist dieses Auswalzen trotzdem noch geringer als im Realversuch. Das prinzipielle Verhalten in den Übergangsbereichen wird bei beiden Modellen jedoch gut abgebildet.

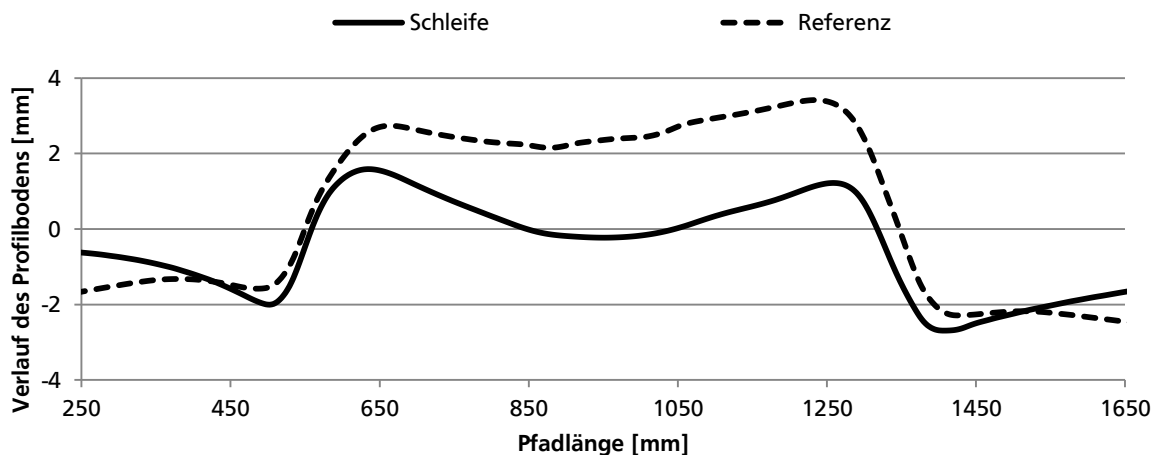


Abbildung 4-8: Abgleich der Simulationsergebnisse von Referenzmodell mit der Jobschleife Zielbauteil

Da es sich bei der überlagerten Längskrümmung der Profile durch das Auswalzen des Profilbodens um einen über der gesamten Bauteillänge wirkenden Effekt handelt, wird die Längskrümmung rechnerisch aus dem Profilverlauf eliminiert. Hierzu werden im aufgeweiteten Bereich des jeweiligen Profilverlaufs der mittlere Krümmungsradius und dessen

¹ **Wallclocktime** definiert die Zeit, welche ein Prozess von seinem Start bis zum Ende in Echtzeit benötigt [FRO98]. Dies beinhaltet im vorliegenden Fall neben der eigentlichen Berechnung der Simulationsmodelle den Import von Ergebnisdaten aus der vorangehenden Simulation und die jeweilige Modellerstellung.

Zentrum bestimmt und anschließend von den Koordinaten subtrahiert (vgl. Abbildung 4-9). Es zeigt sich hierbei eine gute Übereinstimmung der Verläufe von Gesamtsimulation und Jobschleife, wobei die Verwölbung in der Verjüngung des Profils bei der Referenzsimulation etwas stärker abgebildet wird.

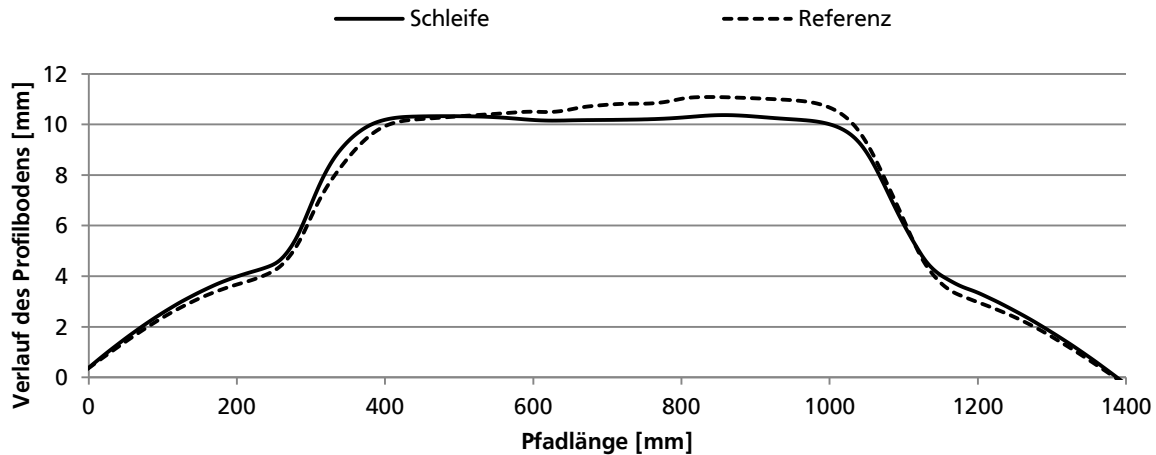


Abbildung 4-9: Abgleich der Simulationsergebnisse von Referenzmodell mit der Jobschleife Zielbauteil mit rechnerisch eliminierter Längskrümmung

Wie zuvor beschrieben kann mittels einzelner Berechnungen der Umformstufen in einer Schleife die Problemgröße erheblich reduziert werden. Hierdurch ergibt sich eine deutlich reduzierte Rechenzeit. Beinhaltet die Simulation neben den flexibel verfahrbaren Umformrollen und den Antriebsrollen noch flexibel verfahrbare Niederhalter (vgl. 6.1), wie sie auf der Prototypenanlage am PtU vorhanden sind, ergibt sich eine noch höhere Zahl an Kontaktkörpern in der Gesamtsimulation. Das Referenzmodell beinhaltet somit eine Gesamtzahl von 62 Werkzeugen. Demgegenüber wäre bei der Jobschleife lediglich eine Anzahl von maximal zwölf Werkzeugen pro Einzelrechnung notwendig. Hierdurch würde der Effekt der Rechenzeitreduktion noch stärker ausfallen als zuvor beschrieben.

4.1.4 Abgleich des Simulationsmodells mit dem Realversuch

Ein Abgleich zwischen den Simulationsergebnissen und denen aus dem Laborversuch wird mittels Geometrieabgleich in GOM ATOS unternommen. Das Zielbauteil aus Abbildung 5-1 wird im Laborversuch auf der 6-stufigen flexiblen Walzprofilieranlage des PtU gefertigt und anschließend mit dem optischen 3D Geometriemesssystem GOM ATOS digitalisiert. In der Auswertung kann anschließend die simulierte Profilgeometrie mit der aus dem Versuch abgeglichen werden (Abbildung 4-10).

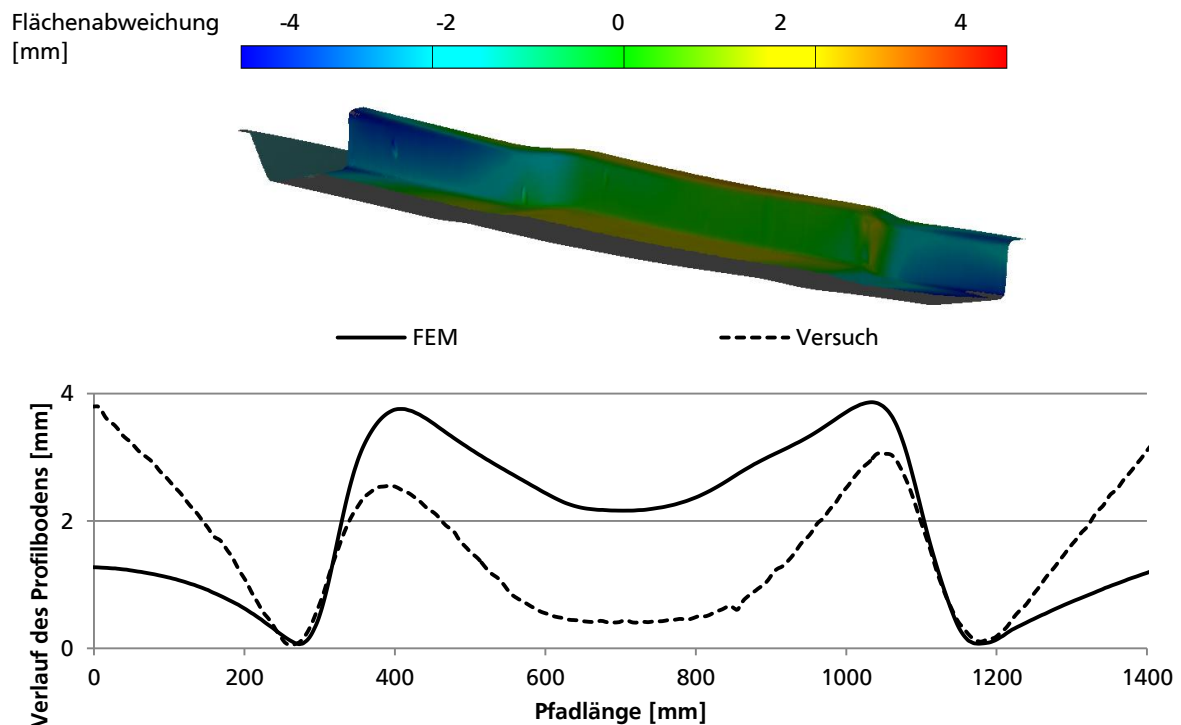


Abbildung 4-10: Flächenabweichung zwischen Simulationsergebnis und dem auf der Versuchsanlage des PtU gefertigten Zielbauteil (oben), Verlauf des Profilbodens entlang der Symmetrieachse (unten)

Beim Geometrievergleich von Simulationsbauteil und Versuchsbauteil kann eine gute Übereinstimmung der prinzipiellen Bauteilgeometrie festgestellt werden. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Biegewinkel im aufgeweiteten Bereich. Die schmalen Bereiche des Versuchsbauteils weisen jedoch andere Rückfederungswinkel gegenüber dem Simulationsmodell auf. Ausschlaggebend hierfür ist das Rückfedern der Bauteilenden nach dem Trennschnitt am Versuchsträger. Ein Vergleich der Profillängsschnitte zeigt eine gute Abbildung der Verwölbung in den Übergangsbereichen, allerdings zeigen sich auch Abweichungen im Verlauf des Profils entlang der Symmetrieachse. Diese sind darauf zurückzuführen, dass das Versuchsbauteil gegenüber dem Simulationsmodell einen deutlichen Längsbogen aufweist. Verantwortlich hierfür ist das Auswalzen des Profilbodens durch die Antriebsrollen. So beträgt die Ausgangsblechdicke am Versuchsbauteil 1,35 mm während nach dem Profilieren im Bauteilboden nur noch eine Blechdicke von 1,34 mm herrscht. Diese Dickenänderung geht hauptsächlich in eine Längung des Profilbodens über, woraus die Längskrümmung resultiert. Um den Einfluss der Längskrümmung zu beseitigen, wurde wie zuvor beschrieben, bei den Verläufen des Profilbodens jeweils im aufgeweiteten Bereich die mittlere Krümmung des Bauteils und deren Zentrum in der Simulation und dem Versuch bestimmt. Im Folgenden wurde diese von der Kontur subtrahiert. Die hieraus resultierenden Verläufe sind in Abbildung 4-11 dargestellt. Es kann hierdurch eine gute Übereinstimmung zwischen Versuch und FEM Simulation festgestellt werden.

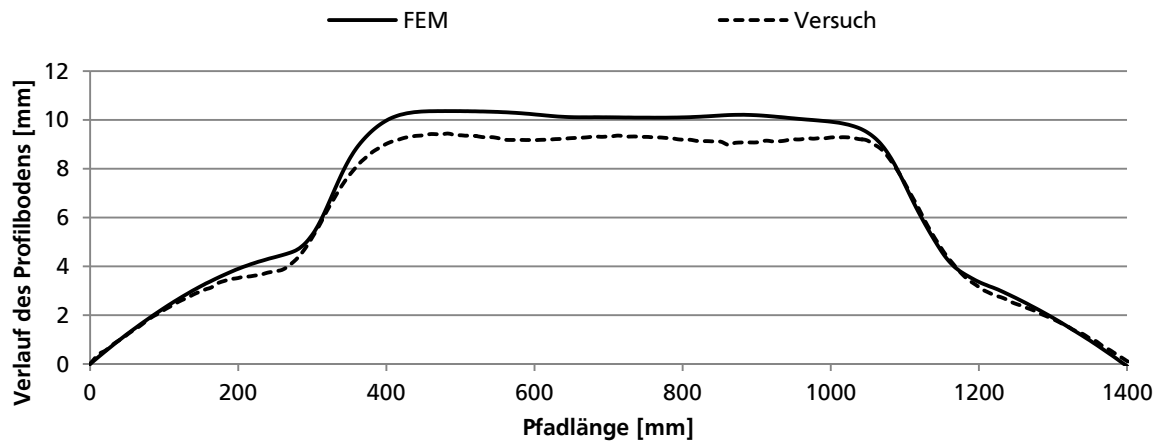


Abbildung 4-11: Verlauf des Profilbodens entlang der Symmetrieachse bei der FEM Validierung mit anschließender Elimination der Längskrümmung

Da die charakteristischen Formabweichungen in Form der Bodenverwölbung qualitativ gut abgebildet werden, erscheint das verwendete Simulationsmodell für die Untersuchungen unterschiedlicher Strategien zur Qualitätssteigerung als ausreichend. Um den Effekt des Auswalzens präzise in der Simulation abbilden zu können, wäre eine deutlich feinere Vernetzung in Blechlängsrichtung notwendig, wodurch die Rechenzeit erheblich ansteigen würde.

5 Analyse des flexiblen Walzprofilierens

5.1 Zielgeometrie

Als Zielgeometrie für die Untersuchungen kommt in der vorliegenden Arbeit ein breitenveränderliches Hut-Profil zum Einsatz. Im Rahmen vorheriger Untersuchungen wurde als prozesslimitierend das Falten im Druckbereich bei breitenveränderlichen U-Profilen untersucht [ZET07]. Dieser Versagensfall ist bei dem breitenveränderlichen Hut-Profil aufgrund der kurzen freien Flansche unwahrscheinlich. Diese können für die Profilstruktur als Einspannungen gegen Beulen gesehen werden [KOL58].

Hut-Profile sind in Automobilkarosserien prinzipiell einsetzbare Strukturbauteile [RÖC08]. Jedoch ergibt sich aus dem zur Verfügung stehenden Bauraum häufig die Anforderung, die Querschnittsgeometrie über der Länge variabel zu gestalten. Mittels flexiblen Walzprofilierens lassen sich solche Bauteile darstellen. Die Abbildung dieses Profiltyps durch das flexible Walzprofilieren lässt eine einfache Variation der Profilgeometrie zu. In Abhängigkeit des Anlagentyps und der damit verbundenen Anzahl der Freiheitsgrade kann der Querschnittsverlauf nahezu beliebig den Anforderungen an das Bauteil angepasst werden. Für das Hut-Profil als Gegenstand der Untersuchung erweist sich die Ebenheit des Bauteils im Gegensatz zum Beulen der Profilschenkel im Druckbereich eines U-Profils als verfahrenseinschränkend.

Die folgende Abbildung zeigt die Zielbauteilgeometrie. Als Basiskonturradius dient $R = 500 \text{ mm}$. Die Zielgeometrie wird in drei Materialgüten hergestellt, wobei ZStE340, TRIP700 und PM800 zum Einsatz kommen. Als Blechstärken werden 1 mm, 1,35 mm und 1,7 mm untersucht.

R	b_1	b_2	h	fl	α
500	55	75	45	15	80°
900	55	75	45	15	80°
1300	55	75	45	15	80°

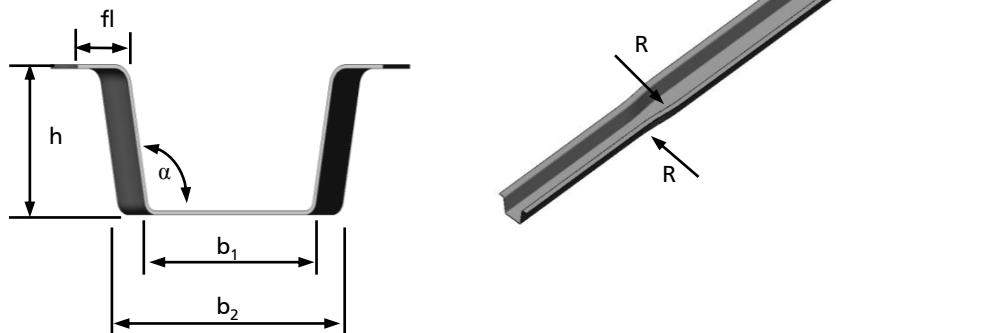


Abbildung 5-1: Zielbauteil Hutprofil

5.2 Versuchsanlage

Die experimentellen Untersuchungen zum flexiblen Walzprofilieren der in Abbildung 5-1 dargestellten Zielbauteile wurden auf einer 6-stufigen flexiblen Walzprofilieranlage am PtU unternommen. Die Zielgeometrie wird in einer Biegewinkelfolge von $15^\circ/30^\circ/50^\circ/70^\circ/80^\circ$ eingeformt, wobei die 80° Stufe aufgrund der geringen Bauteilbreite einseitig ausgeführt ist und somit sechs Umformstufen benötigt werden. Die Versuchsanlage nutzt zur Gewährleistung des Profilverschubs konventionelle Walzprofiliergerüste. Die flexiblen Profiliergerüste bestehen aus unabhängig verfahrbaren Gerüsthälften und ermöglichen somit die Fertigung von symmetrischen als auch asymmetrischen flexiblen Profilen.

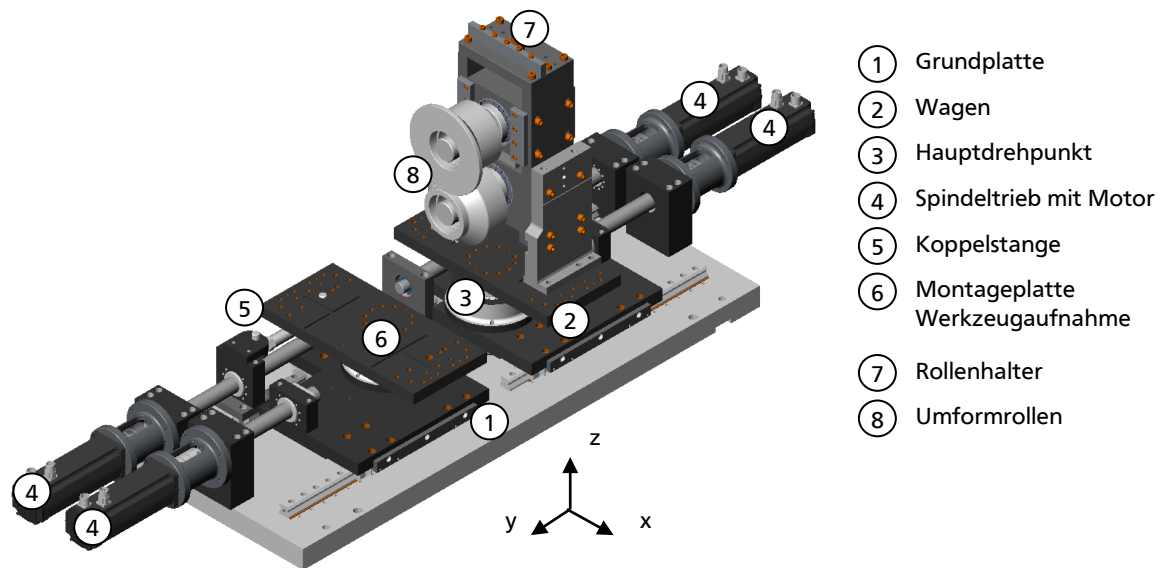


Abbildung 5-2: Flexibles Walzprofiliergerüst der Versuchsanlage, Werkzeugaufnahme mit horizontaler Achslage, vordere Werkzeugaufnahme ausgeblendet

Die kombinierte translatorische und rotatorische Verfahrbewegung ist mittels servogetriebener Spindeltriebe (4) realisiert (Abbildung 5-2). Der Hauptdrehpunkt (3) der Gerüsthälften ist nach außen versetzt, um mehr Bauraum für das Hauptlager zu gewinnen und die Gerüststeifigkeit zu erhöhen. Im Aufbau ist ein Spindeltrieb direkt mit dem Wagen (2) verbunden, der zweite Spindeltrieb ist über eine Koppelstange (5) an der Montageplatte (6) angebunden. Auf der Montageplatte der Kinematik lassen sich die unterschiedlichen Rollenhalter (7) mit den Umformrollen (8) montieren. Die Rollenhalter sind entsprechend des Biegewinkels ausgeführt. Bis zu einer Biegewinkelstufe von 70° kommt eine horizontale Achse zum Einsatz, in den folgenden Stufen ist die Achslage um 25° geneigt, um bei der Fertigung kleinerer Übergangsradien unerwünschte Verformungen durch die Umformrollen an den Profilschenkeln zu vermeiden.

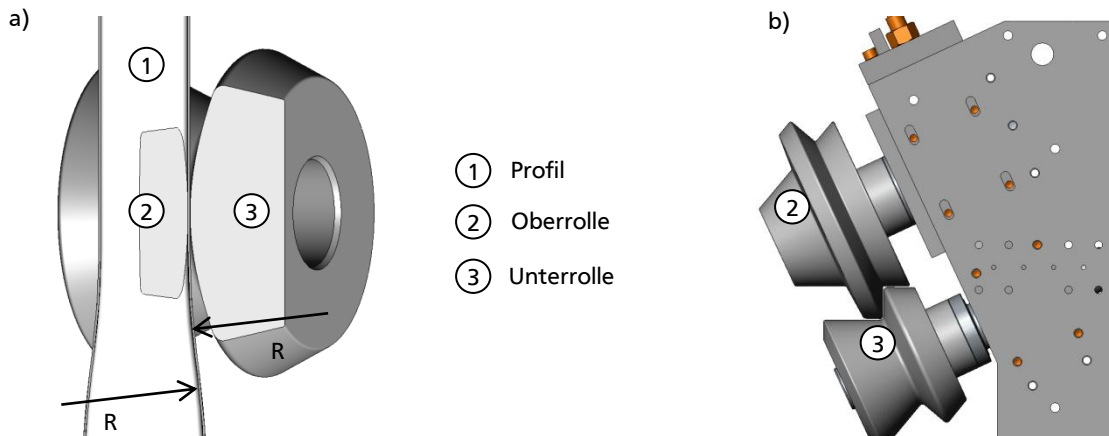


Abbildung 5-3: Schnitt durch ein breitenveränderliches Profil im Eingriff (a) und Ausführung der um 25° geneigten Profilerrollen (b)

Wie aus Abbildung 5-3 ersichtlich kann somit aufgrund der Achslage in Kombination mit der geringen Bauteilbreite in der letzten Einformstufe von 80° nur eine einseitige Einformung vorgenommen werden. Hieraus resultiert final die Umsetzung in der flexiblen Walzprofilieranlage mit sechs flexiblen Einformgerüsten und sieben konventionellen Walzprofiliergerüsten, welche den Blechvorschub gewährleisten (Abbildung 5-4). Die Verfahrensbewegung der flexiblen Gerüste wird von einer zentralen PC-basierten Steuerung in Abhängigkeit von der Blechposition übernommen, wobei diese mittels Reibrädern in der Anlage aufgenommen wird.

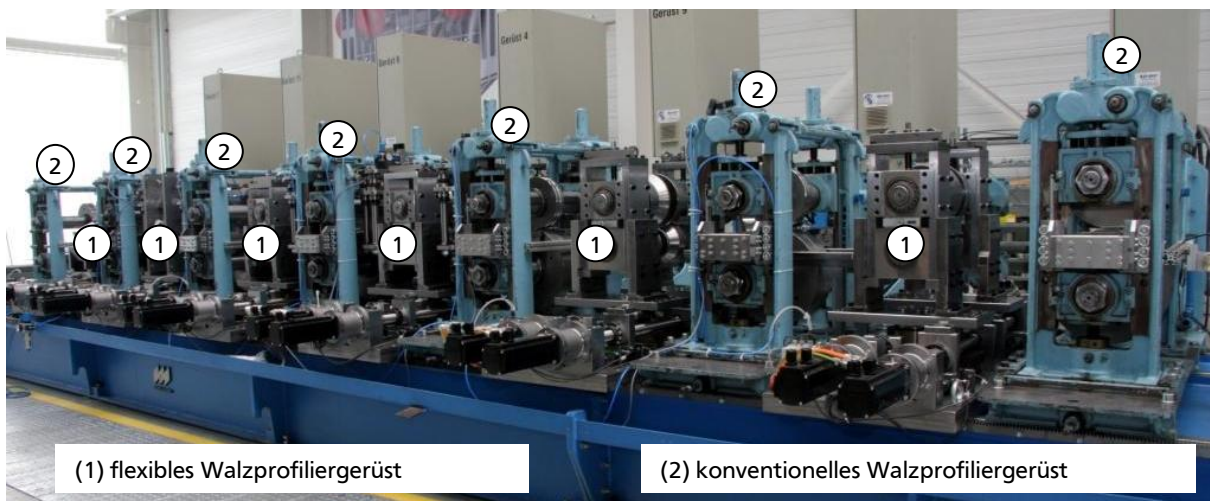


Abbildung 5-4: Versuchsanlage am PtU

5.3 Untersuchungen der Bodenverwölbung

Wie in 2.1.3 beschrieben kommt es neben der Faltenbildung im Druckbereich unter kritischen Parameterkombinationen auch zur Verwölbung des Profilbodens beim flexiblen Walzprofilieren. Zur besseren Bestimmung der Entwicklung der Profilbodenverwölbung während der Einformung werden im Rahmen der Arbeit Untersuchungen in den jeweiligen Einformstufen unternommen. Zum Erreichen einer perfekt ebenen Profilform müssen Längsdehnungen in Zug- und Druckbereich eingebracht werden. Es entstehen konkave und konvexe Bereiche entlang der Übergangszone des Profils. Die Längsdehnungen im Übergangsbereich können wie beim Bördeln von Flanschen jedoch nur ansatzweise getrennt voneinander ermittelt werden, da sich Zug- und Druckbereich gegenseitig beeinflussen [SMI90].

5.3.1 Auftreten und Entwicklung der Bodenverwölbung

Die Umformung beim Walzprofilieren geschieht, wie in 2.1.1 gezeigt, in definierten Biegewinkelschritten, welche in der 2-dimensionalen Darstellung die Profilblume ergeben. Bei dieser stufenweisen Einformung erfahren in einer ersten Näherung auch die Profilschenkel in den Übergangsbereichen beim flexiblen Walzprofilieren einen Zuwachs der Längsdehnungen von Stufe zu Stufe, wobei sich der Unterschied zwischen notwendiger Längsdehnung und erreichter Längsdehnung vergrößert. Dementsprechend erfährt auch die Entwicklung der Bodenverwölbung je Stufe einen Anstieg. Um dieser entgegenzuwirken, ist eine genauere Identifikation der stufenweisen Entwicklung notwendig. Hierzu werden auf numerischer Simulation basierend die Form des Hutprofils in den einzelnen Umformstufen und die Entwicklung der Längsdehnungen im Übergangsbereich betrachtet.

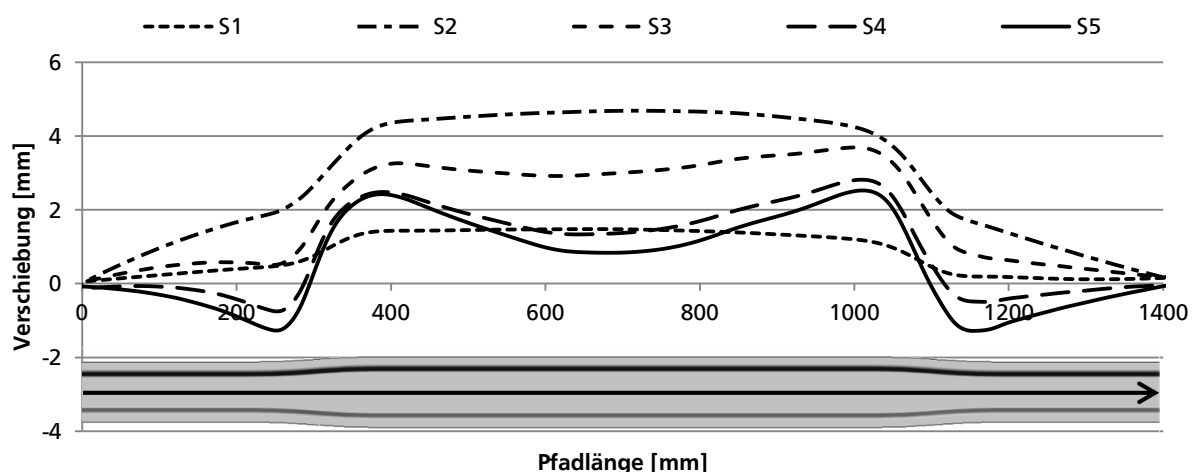


Abbildung 5-5: Verwölbung des Profilbodens in der jeweiligen Umformstufe bei R500 und ZStE340 in 1,35 mm

Abbildung 5-5 zeigt, wie sich die Verwölbung des Profils von Stufe zu Stufe (S1-S5) entwickelt. In den ersten beiden Umformstufen mit 15° und 30° Biegewinkel geht die Verwölbung des Profils noch fließend in die gesamte Profilform über, wohingegen sich ab der dritten Stufe die Verwölbung deutlich gegenüber der gesamten Profilform differenziert. Ab dieser Stufe nimmt die lokale Verwölbung des Profils von Stufe zu Stufe weiter zu. Ein Anstieg von der vorletzten zur letzten Stufe ist nur noch gering gegenüber dem Vorgänger, da hier der Biegewinkel nur noch um 10° erhöht wird (vgl. Abbildung 4-7). Neben diesem Trend zeigt sich weiterhin, dass bei einem Übergang von schmal nach breit, also der Aufweitung, die Profilverwölbung geringer gegenüber der Verjüngung ausfällt (vgl. Abbildung 3-1).

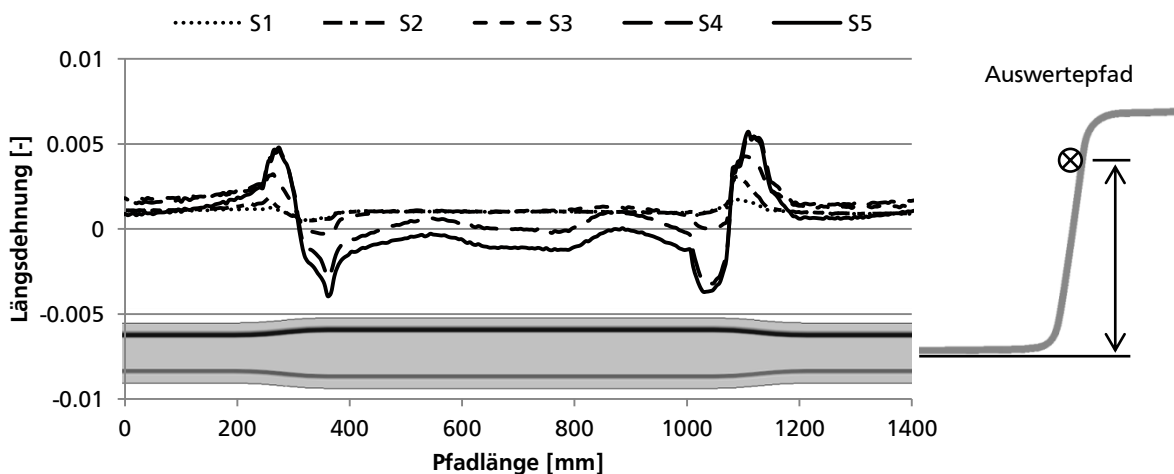


Abbildung 5-6: Entwicklung der Längsdehnung an der Profilinnenseite bei R500 und ZStE340 in 1,35 mm Blechdicke

Abbildung 5-6 zeigt die Entwicklung der Längsdehnungen entlang eines Pfades im oberen Bereich des Schenkels bei einer Höhe von 32 mm. Ersichtlich ist ab der Umformstufe vier die Ausbildung der charakteristischen Zugbereiche im konkaven Abschnitt der Aufweitung und der Druckbereiche im konvexen Abschnitt. Die Verläufe an Profilinnen- und Profilaußenseite sind vergleichbar. Es zeigt sich jedoch, dass die Längsdehnungen verhältnismäßig gering ausfallen. Hierdurch lässt sich die deutliche Verwölbung des Profils in den Übergangsbereichen erklären. Aus den Verläufen der Längsdehnungen zeigt sich, dass sich die Bauteileigenschaften über die Profillänge ändern. Dies steht, wie zuvor in 2.1.3 beschrieben, im Gegensatz zum konventionellen Walzprofilieren, da hierbei durch den konstanten Querschnitt über die Bauteillänge nahezu gleichbleibende Bauteileigenschaften herrschen. Der Grund für die verhältnismäßig geringen Längsdehnungen ist im geringen Werkzeugkontakt des Profils zu suchen. Wie in 2.1 aufgeführt herrscht beim Walzprofilieren ein punkt- bzw. linienförmiger Werkzeugkontakt. Zwischen den Einformstufen ist das Profil nicht abgestützt und kann somit im Verlauf der Einformung eine Position einnehmen, in der sich nur geringe Dehnungen in den Übergangsbereichen einstellen.

Zur Entwicklung von Einflussmöglichkeiten auf den Profilierprozess, speziell in den Übergangsbereichen, wo die charakteristische Verwölbung der Profilbauteile auftritt, soll im

Folgendes das Verhalten des Profils während der Einförmung untersucht werden. Hierzu wurde mittels digitaler Wegmessgeber die Verschiebung des Profils während der Einförmung in unterschiedlichen Abständen der Profiliergerüste aufgenommen. Die Messungen wurden sowohl vor als auch hinter der Einförmstufe durchgeführt (vgl. Abbildung 5-7).

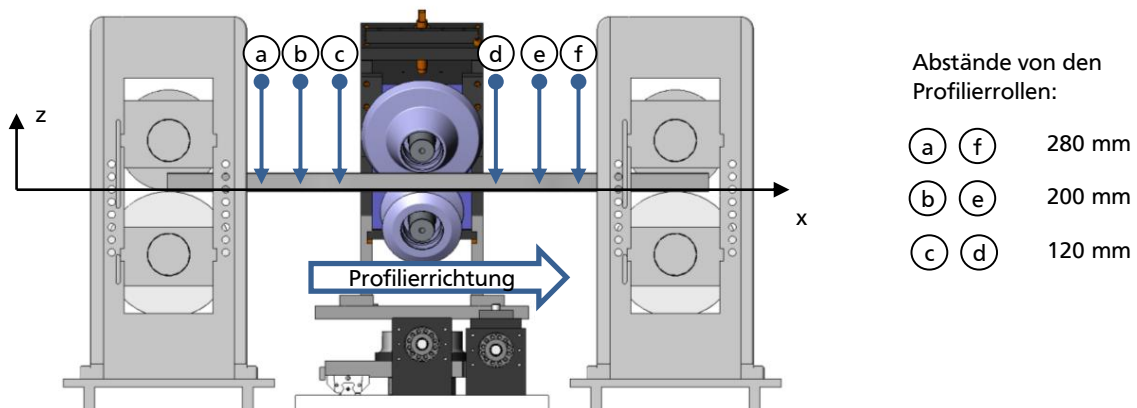


Abbildung 5-7: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Entwicklung der Bodenverwölbung

Die Verschiebungen während des Profilierens werden an den Messstellen a-f über die Zeit aufgenommen. Um eine Zuordnung zur Profilposition bzw. zum Profilquerschnitt zu ermöglichen, ist das Profil mit einer Referenzmarke ausgestattet. Hierdurch lässt sich die Lage der Übergangsbereiche identifizieren.

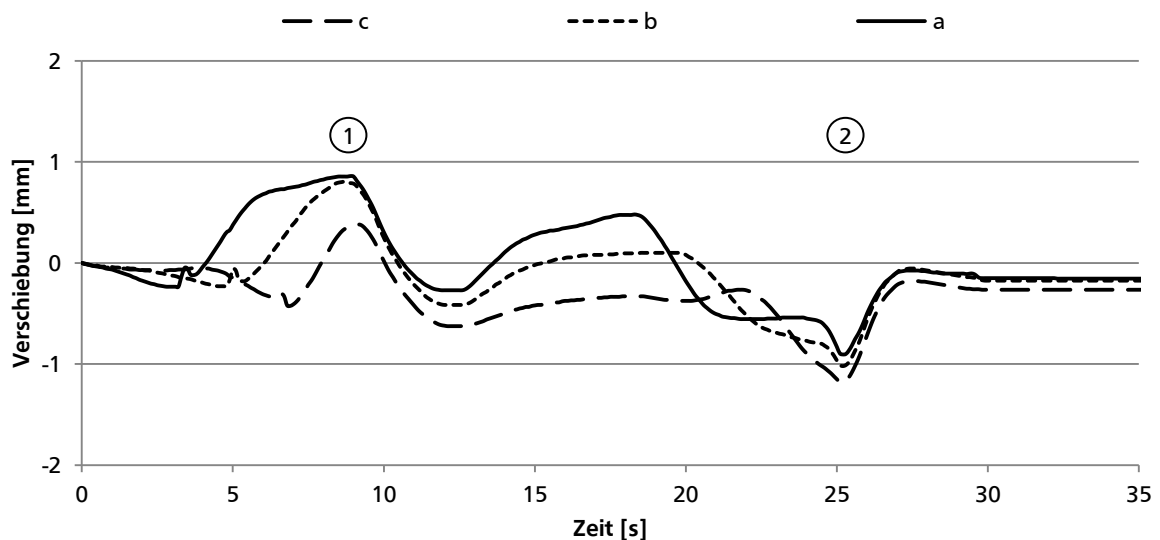


Abbildung 5-8: Verschiebung des Profils in der Anlagenhochrichtung über die Profilierzeit während des Profilierens am Eingang der Einförmstufe 2

Exemplarisch zeigt Abbildung 5-8 die Verschiebung des Profils in Höhenrichtung während der Einförmung in der Profilierstufe 2. Durchlaufen wird sowohl die Aufweitung als auch die Verjüngung des Profils. Es fällt auf, dass das Profil während der Einförmung im

Übergangsbereich sowohl angehoben als auch abgesenkt wird. Die Verläufe zeigen, dass die Verschiebungen der Messstellen a-c zu den Zeitpunkten (1) und (2) jeweils gleichzeitig ihre maximale Auslenkung erfahren. Die maximalen Auslenkungen bei der Einformung der Aufweitung erfahren hierbei die Positionen (a) und (b). Im Gegensatz hierzu erfahren beim Einformen der Verjüngung die Position (c) und (b), also die dem Umformgerüst näheren Bereiche, eine größere Auslenkung.

Die maximalen Verschiebungen in Höhenrichtung sind in Abbildung 5-9 und Abbildung 5-10 dargestellt. Eingangsseitig wurde die Verschiebung an den Stufen 2 bis 6 aufgenommen, wobei die Messposition e in Stufe 5 nicht messbar war. Ausgangsseitig konnte aufgrund der Messradpositionen nur Stufe 3 und 5 aufgenommen werden. Wohingegen die Verschiebungen in den ersten Stufen noch gering ausfallen, kommt es in den folgenden Stufen zu einem deutlichen Anstieg der Verschiebung in Höhenrichtung. Es wird deutlich, dass die Verschiebung bis auf einen Absolutwert von ca. 4 mm ansteigen. Darüber hinaus zeigt sich eine tendenziell höhere eingangsseitige Verschiebung bei der Aufweitung, wohingegen bei der Verjüngung die ausgangsseitigen Verschiebungen größere Ausschläge erfahren. Dies trägt zu unterschiedlichen Verwölbungen des Profils in Aufweitung und Verjüngung bei.

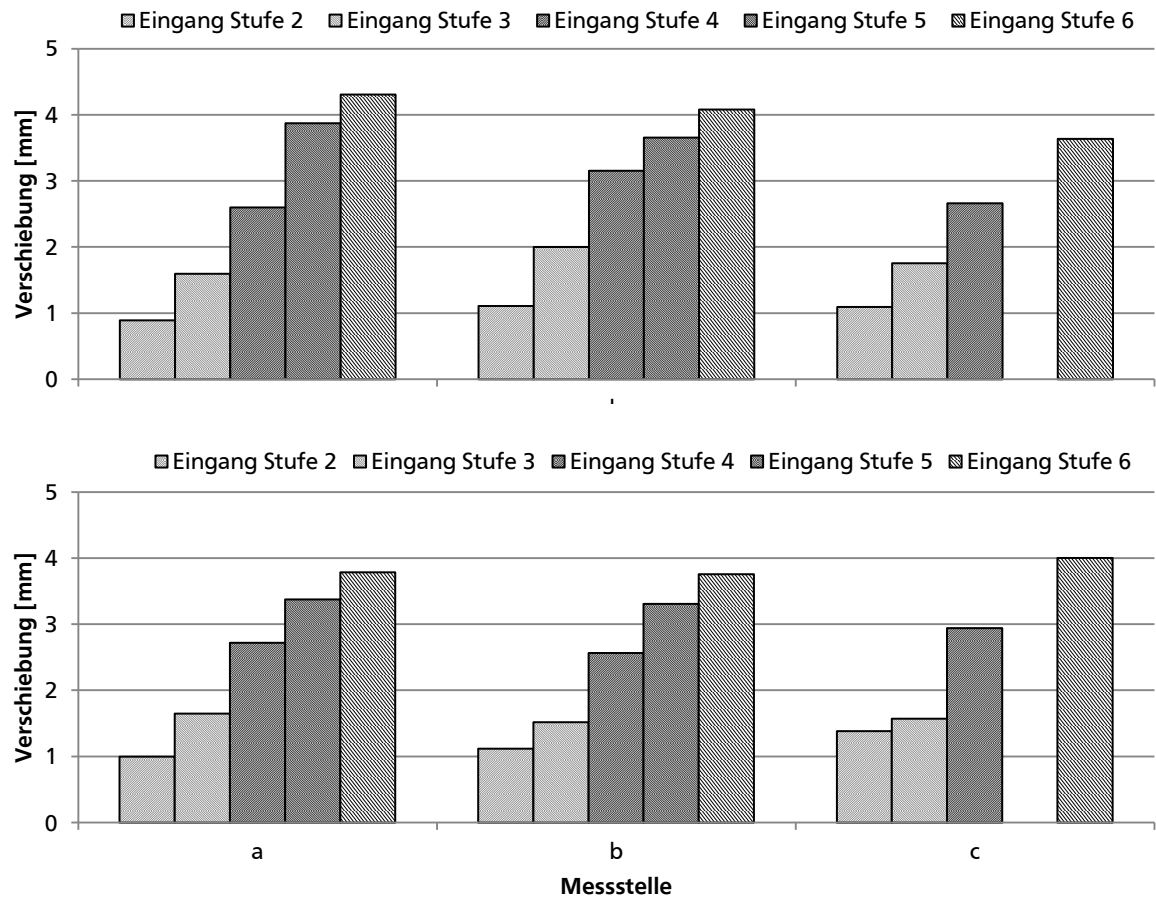


Abbildung 5-9: Maximale Verschiebung bei der Aufweitung (oben) und Verjüngung (unten) am Eingang der flexiblen Walzprofiliergerüste

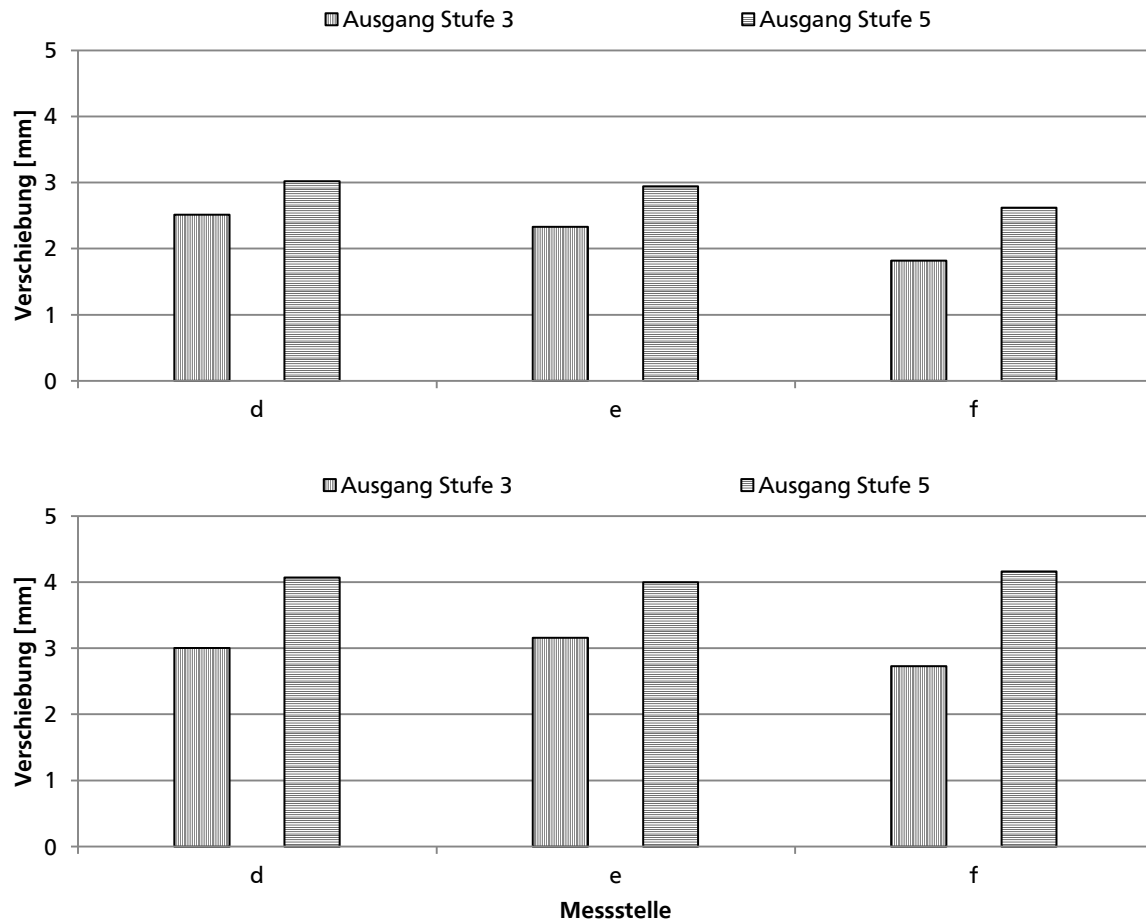


Abbildung 5-10: Maximale Verschiebung bei der Aufweitung (oben) und Verjüngung (unten) am Ausgang der flexiblen Walzprofiliergeräte

5.3.2 Sensitivität der Bodenverwölbung auf unterschiedliche Parameter

Die Entwicklung der Bodenverwölbung konnte in 5.3.1 am Beispiel einer speziellen Profilgeometrie aufgezeigt werden. Als Referenzbauteil dient die Profilgeometrie mit einem Konturradius $R = 500 \text{ mm}$ mit einem Blechzuschnitt in ZStE340 der Blechdicke $t = 1,35 \text{ mm}$. Hier soll eine Übertragbarkeit auf andere Verfahrensparameter betrachtet werden. In diesem Rahmen werden an der Zielgeometrie die unterschiedlichen Bauteilparameter aus Abbildung 5-1 variiert. Exemplarisch zeigt Abbildung 5-11 den Verlauf des Profilbodens nach dem Profilieren für unterschiedliche Blechdicken. Der qualitative Verlauf des Profilbodens für die unterschiedlichen Parameter ist vergleichbar. Hinsichtlich des quantitativen Verlaufes zeigt sich jedoch, dass bei größerer Blechdicke die Verwölbung des Profils abnimmt.

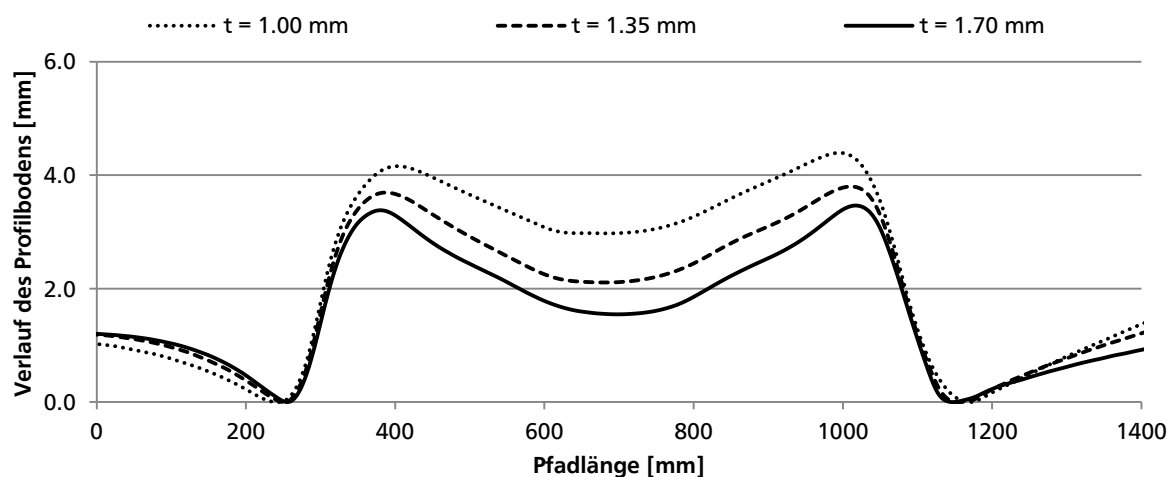


Abbildung 5-11: Verwölbung des Profilbodens R500 und ZStE340 und Blechdicken von 1 mm, 1,35 mm und 1,7 mm

Die Auswertung der Verwölbung für die unterschiedlichen Bauteilparameter zeigt sich in Abbildung 5-12. Die ermittelten Werte für das Referenzbauteil sind hier feinschraffiert im Vergleich zu den anderen Parameterkombinationen dargestellt. In der Aufstellung werden die Einflüsse aus den Bauteilparametern auf die Verwölbung des Profilbodens ersichtlich. Es zeigt sich, dass bei steigender Festigkeit der Effekt der Bodenverwölbung stärker auftritt. Durch den Anstieg der Streckgrenze bedarf es einem höheren Niveau von außen eingebrachter Kräfte, um Längsdehnungen in die Profilschenkel einzubringen. Da dies über den eingeschränkten Werkzeugkontakt nicht ausreichend während der Umformung gewährleistet werden kann, kommt es zum Anstieg der Verwölbungen im Übergangsbereich.

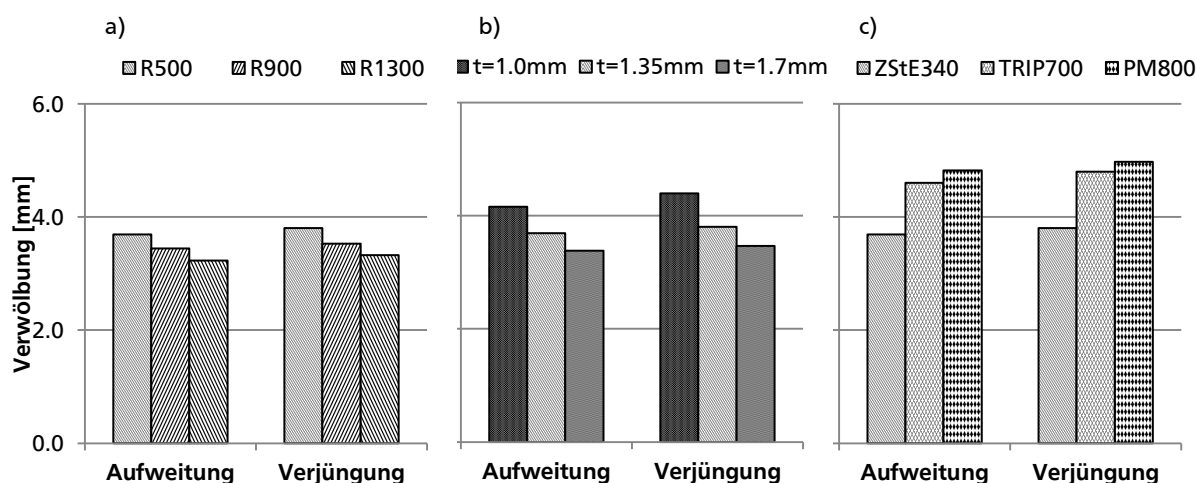


Abbildung 5-12: Verwölbung des Profilbodens mit a) Konturradien R500, R900 und R1300, b) Blechdicken 1 mm, 1,35 mm und 1,7 mm, c) Materialien ZStE340, TRIP700 und PM800

Daneben erweist sich die Vergrößerung des Konturradius als Möglichkeit, diese Formabweichung zu verringern. Dies begründet sich in der größeren Strecke, über die die Aufweitung stattfindet. Nach [ZET07] ergibt sich bei einem U-Profil die Längsdehnung im Übergangsbereich zu:

$$\varphi_v = \kappa_v |\varphi_{analytisch}| = \kappa_v \left| \ln \frac{R}{R_{druck}} \right| \quad \text{Formel 5-1}$$

Hierbei ist R der Konturradius im Druckbereich und R_{druck} der Radius des Blechzuschnitts. Aufgrund der Interaktion zwischen Zug- und Druckbereich kommt bei der Bestimmung der Vergleichsdehnung der material- und geometrieabhängige Ausgleichsfaktor κ_v zum Einsatz. Dieser Faktor korrigiert die Längsdehnungen im Profilflansch gegenüber einer analytischen Herleitung über der Membranspannung im konvexen Flansch. Entsprechend ergibt sich am U-Profil der Umformgrad im Zugbereich. Es zeigt sich also, dass die Längsdehnungen im Übergangsbereich mit zunehmendem Konturradius abnehmen. Es müssen somit zum Erreichen eines ebenen Profilbodens geringere Längsdehnungen eingebracht werden.

6 Strategien zur Qualitätsoptimierung beim flexiblen Walzprofilieren für eine spezielle Geometrie

6.1 Zusatzkomponenten in flexiblen Walzprofilieranlagen

Wie in 5.3 gezeigt reicht die eingesetzte Anlagentechnik, bestehend aus flexiblem Profiliergerüst und konventionellem Antriebsgerüst, nicht aus, um das lokale Verwölben des Profils im Übergangsbereich zu verhindern. Die äußere Krafteinleitung ist aufgrund der geringen Werkzeugkontakte lokal zu beschränkt, um dem Profil die Zielgeometrie aufzuzwingen. Zwischen den Profilierstufen kann das Profil eine für sich energetisch günstige Position einnehmen und so das Einbringen notwendiger Längsdehnungen behindern. Um diese zu erzwingen, muss das Profil zwischen den Umformstufen geführt bzw. in Position gehalten werden. Hierzu soll in diesem Kapitel ein Niederhaltersystem entwickelt werden. Ziel bei dieser Entwicklung ist es, ein System bereitzustellen, welches dazu führt, geometrisch eng tolerierte Bauteile fertigen zu können. Gleichzeitig jedoch darf ein solches System die Investition für eine flexible Walzprofilieranlage nicht deutlich steigern, um Wettbewerbsvorteile gegenüber abbildenden Verfahren zu wahren. Ein solches System hat dementsprechend die Aufgabe, die freien Strecken ohne Krafteinleitung in das Profil beim Profilieren zu minimieren (vgl. Abbildung 6-1).

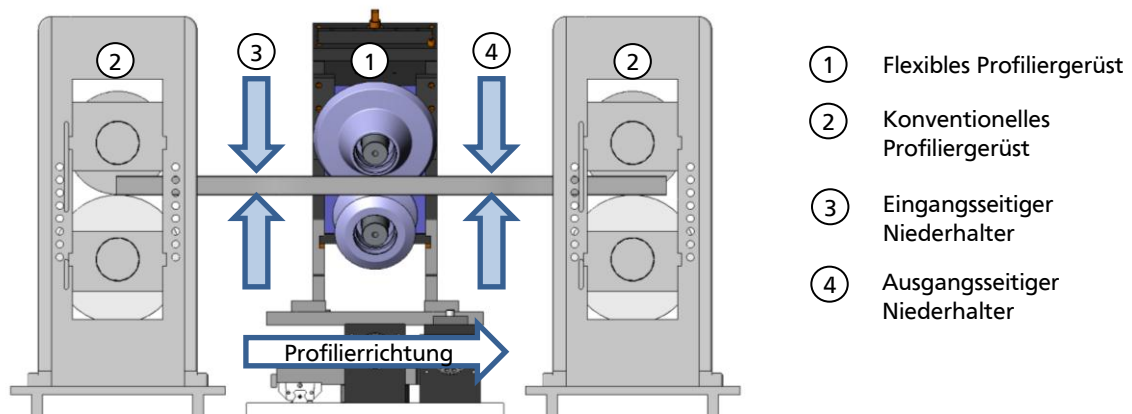


Abbildung 6-1: Werkzeugsystem mit flexiblem Walzprofiliergerüst, konventionellen Antriebsgerüsten und schematischer Darstellung von Niederhaltern vor und hinter dem flexiblen Profiliergerüst

6.1.1 Niederhaltersysteme in flexiblen Walzprofilieranlagen

Im Rahmen der Entwicklung eines Niederhaltersystems für flexible Walzprofilieranlagen soll ein möglichst umfassendes Spektrum aufgezeigt werden. Nach [PAH07] lassen sich für ein

Gesamtsystem Lösungen für die einzelnen Funktionen aufstellen. Diese können dann miteinander kombiniert werden, wodurch es zu einem umfassenden Lösungsspektrum kommt. Um dies einzuschränken, müssen die Einzellösungen auf ihre Verträglichkeit hin überprüft und den Anforderungen an das Gesamtsystem entsprechend bewertet werden.

Einer der zentralen Vorteile des flexiblen Walzprofilierens ist die einfache Realisierung neuer Bauteilgeometrien mittels Anpassung der Verfahrensbewegungen. Bei der Entwicklung einer Niederhaltereinheit sind somit die in der Anlage befindlichen Bewegungen von Werkstück und Werkzeugsystem zu berücksichtigen. Der Vorschub des Profils in Profilierrichtung erzwingt die Unterscheidung zwischen ortsfesten und mitlaufenden Systemen. Aufgrund des Vorschubs kommt es bei einem ortsfesten Niederhaltersystem zu einer Relativbewegung zwischen Niederhalterkontaktkörper und Halbzeug oder bei einem mitlaufenden System zu einer Veränderung der Position des Niederhalters relativ zum flexiblen Gerüst. Weiterhin weitet bzw. verjüngt sich das Profil während der Einformung in den Übergangsbereichen. Dies bedingt eine Querverstellung der Werkzeuge kombiniert mit einer Rotation um die Anlagenhochachse, um möglichst nahe dem Profilschenkel die Niederhalterkraft einzubringen. Diese sind vergleichbar mit denen der flexiblen Profiliergerüste. Neben diesen Bewegungsrichtungen, die sich direkt aus der Werkstückgeometrie ergeben, kann ein Niederhaltersystem prinzipiell auch noch Freiheitsgrade außerhalb der Profilierebene beinhalten, um so auch eine Bewegung entgegen der Bodenverwölbung zu ermöglichen. Hierzu ist, vergleichbar mit den Forderungen an die Verfahrensbewegung der flexiblen Gerüste, auch eine Rotation um die Anlagenquerachse erforderlich (vgl. Abbildung 2-7). Die einzelnen Varianten für mögliche Freiheitsgrade sind in Tabelle 6-1 zusammengefasst.

	Variante 1	Variante 2
Translation in Profilierrichtung	Ortsfest	Mitfahrend
Translation in Querrichtung	Ortsfest	Konturfolgend
Rotation um die Hochachse	Keine Rotation	Konturfolgend
Translation außerhalb der Profilebene	Ortsfest	Mitfahrend
Rotation um die Querachse	Keine Rotation	Gesteuerte Rotation

Tabelle 6-1: Prinzipielle Lösungen für einzelne Verfahrensbewegungen eines Niederhaltersystems

Neben der Niederhalterfunktion der Verfahrensbewegungen kommt der Gestaltung der Kontaktkörper eine zentrale Bedeutung zu. Diese beeinflussen in einem wesentlichen Maße die Oberflächenqualität und die Möglichkeit, äußere Kräfte während des Profiliervorganges

einzubringen. Die einzelnen Funktionen können unterteilt werden in Kontaktpaarung und den Kontaktbereich zwischen Niederhalter und Werkstück (vgl. Tabelle 6-2).

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Kontaktpaarung	Flächig	Linienförmig	Punktförmig	
Kontaktbereich	Profilboden	Profilschenkel	Profilflansch	Kombiniert

Tabelle 6-2: Prinzipielle Lösungen für Kontaktpaarungen eines Niederhaltersystems

Durch die Verknüpfung dieser Einzellösungen dieser Hauptfunktionen kann ein umfassendes Lösungsspektrum erstellt werden. Theoretisch ergibt sich nach

$$N = n_1 \times n_2 \dots \times n_m = \prod_{i=1}^m n_i \quad \text{Formel 6-1}$$

eine Gesamtzahl von 384 Gesamtlösungen [PAH07]. Um diese einzugrenzen, müssen theoretisch mögliche Lösungen auf ihre Eignung untersucht und eventuell ausgeschlossen werden. Die für eine Niederhaltereinheit in Frage kommenden Kontaktbereiche lassen sich aufgrund der hauptsächlich notwendigen Wirkrichtung der Niederhalterkraft einschränken. Hierbei lässt sich eine Krafteinleitung nur über den Profilschenkel ausschließen, da dieser in fortgeschrittenen Umformstufen nahezu parallel zur Niederhalterkraft in Höhenrichtung liegt und somit hier keine effektive Krafteinleitung in das Profil möglich wäre. Bei einer Einleitung in die Flansche wäre eine Weiterleitung der Niederhalterkräfte über die Profilschenkel notwendig. Bei einer Verschiebung des Profils nach oben würden somit Niederhalterkräfte Druckspannungen in den Profilschenkel induzieren, wobei dieser dann gerade bei geringen Blechstärken ausbeulen und somit äußere Kräfte nicht optimal einleiten könnte. Darüber hinaus würde die Einleitung über die Flansche zur Beeinflussung der Einformlänge führen. Hierdurch könnten durch Längsdehnungen in den geraden Profilbereichen ungewünschte Formabweichungen entstehen. Dieser Effekt wäre auch bei einer kombinierten Kontaktzone zu erwarten, da ein Niederhalter dann vergleichbare Ausprägungen hätte wie eine Einformstufe. Somit wird eine Krafteinleitung über den Profilboden verfolgt.

Bei der Betrachtung der möglichen Freiheitsgrade zeigt sich, dass die hohe Anzahl von Bewegungsrichtungen schnell zu einer hohen Komplexität eines Niederhaltersystems führen kann. So wird bei der Berücksichtigung aller möglichen Freiheitsgrade ein System mit fünf Verfahrrichtungen generiert. Unter der Annahme, dass für jeden Freiheitsgrad ein Aktor bereitgestellt werden muss, erhöht sich deren Anzahl pro Einformstufe von vier auf 24 bei der Verwendung von Niederhaltern vor und hinter dem flexiblen Walzprofiliergerüst. Dies widerspricht jedoch deutlich der Forderung nach einem kostengünstigen System zur Unterstützung der Profileinrichtung. Gerade die Verfahrbewegung in Höhenrichtung scheint

hier den Aufwand stark zu erhöhen, da es sich hierbei um einen aktiven Prozesseingriff handelt und die Verfahrbewegungen vergleichbar mit denen eines flexiblen Gerüsts eingebracht werden müssen. Um eine Verschränkung des Profilquerschnittes zu vermeiden, müsste die Verfahrbewegung kombiniert translatorisch und rotatorisch realisiert werden (vgl. Abbildung 2-7). Eine solche Lösung bringt zwar eine maximierte Anzahl von Eingriffsmöglichkeiten in den Prozess mit sich, erhöht aber aufgrund der notwendigen Komplexität den Anlageninvest. Im Folgenden sollen dementsprechend Systeme mit einer Höhenveränderung nicht berücksichtigt werden.

Vorteilhaft bei einem in der Profilierrichtung beweglichen System ist die Möglichkeit, eine Relativbewegung zwischen Profil und Niederhaltersystem zu vermeiden. Ein vergleichbares System ist in [P03] beschrieben. Dieses ist so aufgebaut, dass das Profil an einer definierten Stelle vor bzw. hinter dem flexiblen Walzprofiliergerüst geklemmt wird und sich synchron mit dem Blechvorschub in Profilierrichtung bewegt. Das System verharnt jedoch während des Profiliervorganges in dieser Position relativ zum Blech, bis es wieder gelöst wird. Somit muss ein solches System in Profilierrichtung mitfahren und, um am folgenden Übergangsbereich einsatzbereit zu sein wieder in die Ausgangsposition zurückfahren. Hierfür muss ein weiterer Antrieb bereitgestellt werden. Ein weiteres Niederhaltersystem, bei welchem keine Relativbewegung zwischen Profil und Niederhalter in Profillängsrichtung stattfindet, ist in [P04] beschrieben. Hier wird die Niederhalterfunktion durch einen durch die Anlage laufenden Kettentrieb übernommen. Eine Relativbewegung in Vortriebsrichtung zwischen Werkstück und Anlage wird somit durch den Kettentrieb gewährleistet. Die klemmenden Niederhalterflächen können hierbei passiv mit dem Blechvortrieb mitlaufen oder aktiv den Vortrieb des Profils bereitstellen. Als nachteilig hierbei könnten sich mögliche Überschneidungen zwischen den flexiblen Umformrollen und den Niederhalterkörpern auswirken, wenn die Übergangsbereiche eingeformt werden. Hierdurch müssen die Niederhalterkörper schmal ausgeführt werden um eventuelle Kollisionen zu verhindern oder die einzelnen Niederhalterkörper des Kettenmoduls müssen in Profilquerrichtung verschiebbar sein. Speziell bei größeren Aufweitungsverhältnissen kann es dann zu Freiräumen zwischen Umformrolle und Niederhalter kommen, woraus eine nichtoptimale Abstützung resultiert.

6.1.1.1 Kontaktkörper in ortsfesten Niederhaltersystemen

Bei ortsfesten Niederhaltersystemen besteht immer eine Relativbewegung zwischen dem Niederhalter und dem Werkstück. Somit kommt der Kontaktpaarung von Niederhalter und Werkstück eine besondere Bedeutung zu. Als Kontaktkörper kommen Gleitelemente (flächiger Kontakt), Kugeln (punktförmiger Kontakt) oder Rollen (linienförmiger Kontakt) in Frage (vgl. Tabelle 6-2).

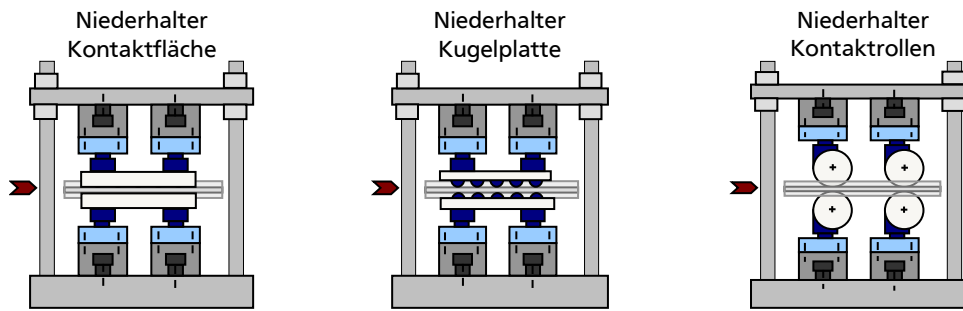


Abbildung 6-2: Vergleich unterschiedlicher Niederhalter Kontaktkörper (vgl. [GRO09])

Die unterschiedlichen Niederhalterkontaktkörper sollen nach den Kriterien Größe der Kontaktzone, Reibung in der Anlage, Einfluss auf die Oberflächenqualität des zu fertigenden Bauteils und Realisierbarkeit in dem zur Verfügung stehenden Bauraum bewertet werden.

Beim Niederhalterprinzip mit einer flächigen Kontaktzone entsteht 100% Schlupf zwischen dem umgeformten Profil und dem Niederhalter. Vergleichbar ist ein Niederhalter mit Kontaktfläche mit einer Führung in einer konventionellen Walzprofilieranlage. Wohingegen eine solche Führung im Idealfall nur während des Einfädelns des Bleches in die Umformstufe im Einsatz ist [HAL06], muss der Niederhalter in einer flexiblen Walzprofilieranlage jedoch immer im Eingriff sein, wenn ein Übergangsbereich eingeformt wird. Die Kontaktkörper sind als Gleitelement darstellbar, welche metallisch oder in Kunststoff ausgeführt werden können [HAL06]. Wie Untersuchungen im Rahmen von [LAR10] gezeigt haben, erreichen die Kräfte, die durch den Niederhalter eingebracht werden, ein hohes Niveau und treten sehr konzentriert auf, wodurch hohe Flächenpressungen entstehen. Diese bedingen bei beschichtetem Blechband abrasiven Verschleiß der Beschichtung, wodurch der Korrosionsschutz erheblich reduziert wird (vgl. Abbildung 6-3).

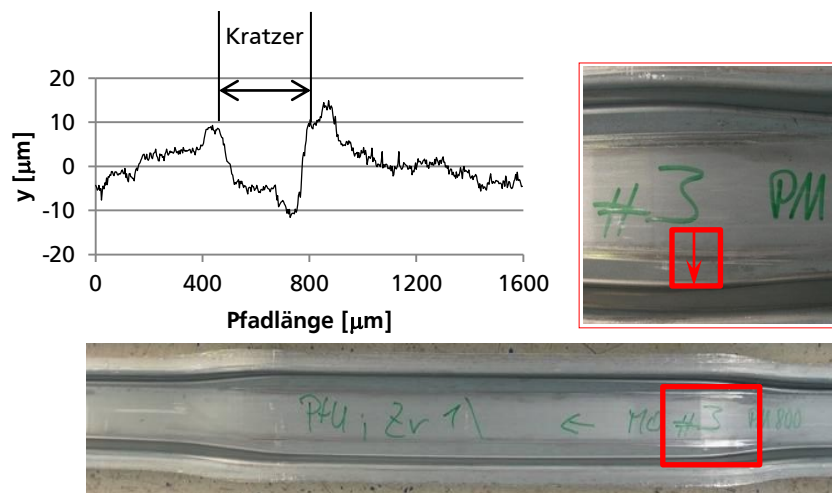


Abbildung 6-3: Beschädigung der Zinkschicht durch den Einsatz flächiger Niederhalter aus Werkzeugstahl beim flexiblen Walzprofilieren

Das Auftreten dieser deutlichen Marken lässt außerdem noch auf eine starke lokale Konzentration der Kontaktnormalspannungen zwischen Blech und Niederhalter im Bereich der Niederhalteraußenbereiche schließen. Die Oberflächenvermessung mittels konfokalem Weißlichtmikroskop Nanofokus μ Surf zeigt den Verlauf der Blechoberfläche im Kontaktbereich des Niederhalters. Im Bereich des Niederhalterkontaktes zeigt sich hierbei eine deutliche Vertiefung über ca. 0,3 mm Länge. Die Ränder der Vertiefung sind leicht überhöht und es ist ein Kratzer von etwa 10 μ m Tiefe sichtbar. Bei elektrolytischer Verzinkung ist somit davon auszugehen, dass die nach [DIN 50961] definierte Schichtdicke beschädigt und kein Korrosionsschutz gewährleistet ist. Darüber hinaus verursacht der Schlupf in Verbindung mit den hohen Kontaktkräften eine den Blechvorschub behindernde Reibkraft, wodurch der Bedarf an Antriebsmoment in der Anlage ansteigt.

Um Schlupf zwischen Werkstück und Niederhalter zu vermeiden, bietet sich als Alternative eine Variante mit Kugelrollen an. Hierbei wird die Kontaktfläche durch eine Vielzahl von einzelnen Kontaktpunkten substituiert. Die auftretenden Kräfte an den Niederhaltern werden anstatt auf die Niederhalterfläche auf einzelne Niederhalterpunkte in Form von Kugeln verteilt. Es ergibt sich im Idealfall also eine nahezu gleichwertig große Kontaktzone wie bei der Verwendung von Kontaktflächen. Das hohe Kraftniveau am Niederhalter bedingt die Verwendung von Schwerlastkugeln. Aufgrund deren Bauart erweist sich die Abbildung flächiger Niederhalterkomponenten jedoch als schwierig, sobald Profilbauteile mit geringer Baubreite hergestellt werden. Um große Lasten aufnehmen zu können, müssen die Kontaktkugeln mit ausreichend großen Abstützkugeln hinterfüllt werden, womit der Bauraum pro Kugeleinheit auf ein erhebliches Maß ansteigt. Hieraus folgt, dass aufgrund der Bauraumverhältnisse in den fortgeschrittenen Profilierstufen die Krafteinleitung hauptsächlich über den Mittelnbereich des Profilbodens stattfindet.

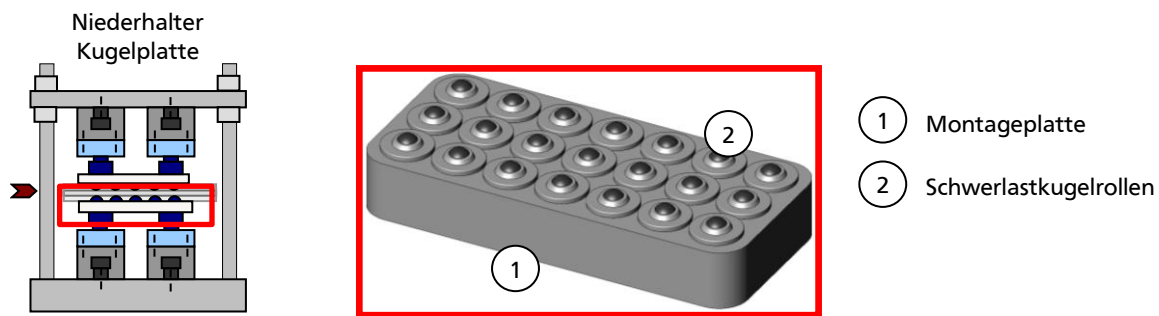


Abbildung 6-4: Kugelplatte als Substitution des flächigen Niederhalters

Als dritte Alternative bietet sich eine Abbildung des Niederhalters mit Linienkontakt. Hierbei lassen sich die Kontaktkörper in Form von Laufrollen als günstige Standardelemente einsetzen. Die Kontaktbereiche sind hierdurch gegenüber den zuvor genannten Möglichkeiten deutlich reduziert. Der Kontakt liegt nur sehr lokal vor, jedoch kann der Kontaktbereich durch Hintereinanderschalten mehrerer Laufrollen vergrößert werden (vgl. Abbildung 6-5). Wie bei der Verwendung von Kugelrollen kann auch von nahezu schlupffreien Kontaktverhältnissen

mit Rollreibung ausgegangen werden. Zur Optimierung der Wirkung von Niederhaltern mit Linienkontakt kann weiterhin die Eingriffsposition von oberem und unterem Kontaktkörper variiert werden. Neben den eigentlichen Kontaktkörpern sind in Abbildung 6-5 Führungsrollen (2) am inneren Niederhalterkörper dargestellt. Diese haben zur Aufgabe der Profilkontur in einem kraftgesteuerten System zu folgen. Durch die Anordnung von 2 Führungsrollen vor und hinter der eigentlichen Kontaktrolle kann ein beidseitig wirkendes Moment um die Hochachse eingebracht werden, wodurch der Niederhalter sowohl bei der Aufweitung als auch bei der Verjüngung der Profilkontur folgen kann (vgl. 6.1.2).

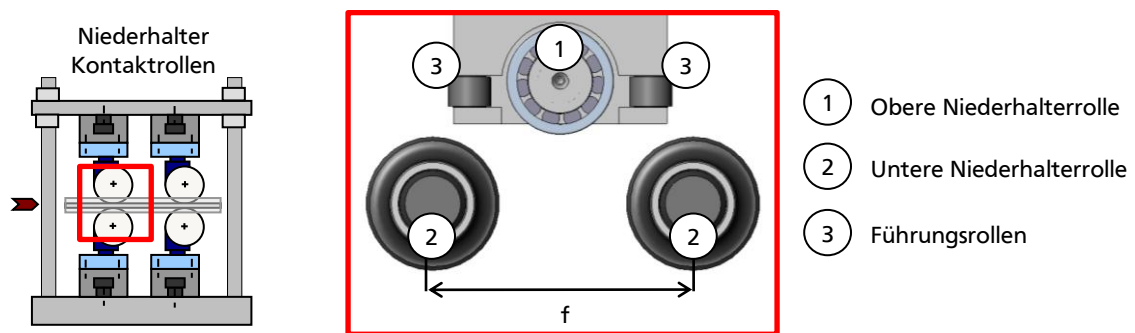


Abbildung 6-5: Linienförmiger Niederhalter, Vergrößerung der Kontaktbereiche

Abbildung 6-6 zeigt einen Vergleich der Kontaktsuren bei der Verwendung von Gleitplatten und Laufrollen als Niederhalterkörper. Wie erwähnt kann es mit Gleitplatten zu deutlichen Verschleißmarken auf der Profiloberfläche kommen. Speziell im Übergangsbereich kann abrasiver Verschleiß identifiziert werden, wohingegen die Verwendung von Rollen als Kontaktkörper nur zu einer Einebnung der Profiloberfläche führt. Diese ist je nach verwendetem Radius an der Außenseite der Niederhalterrolle vergleichbar mit denen der Profilierrollen.

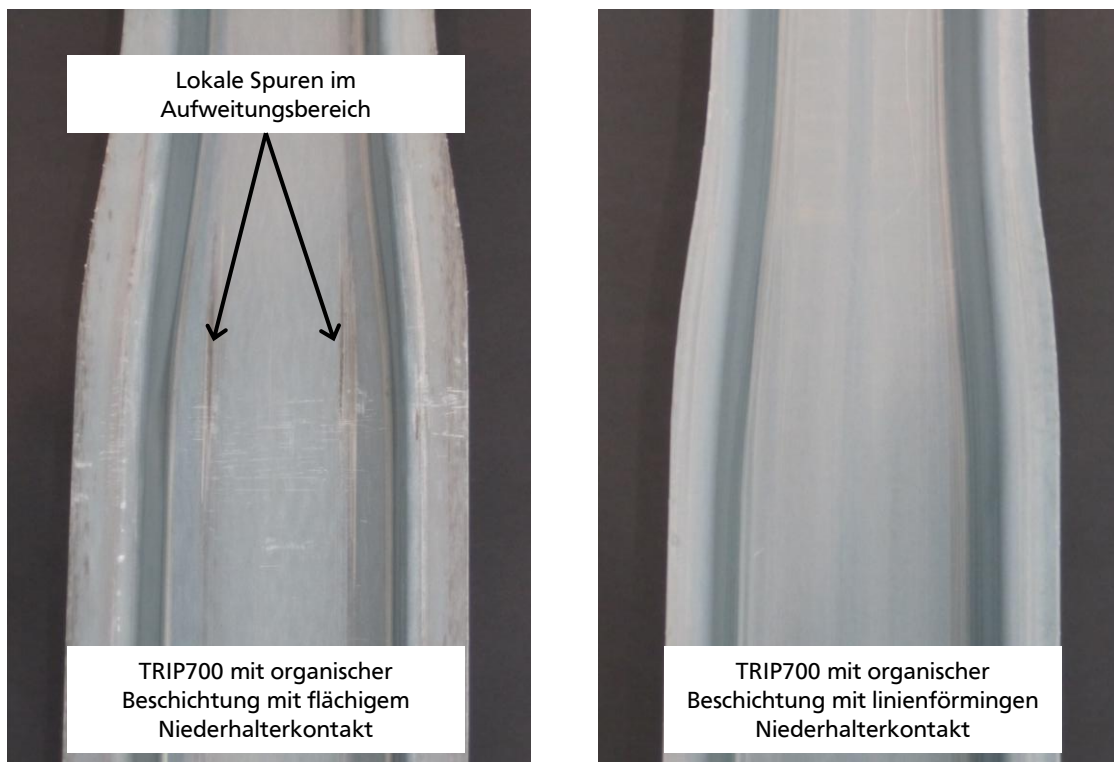


Abbildung 6-6: Vergleich der Oberflächen mit flächigem Niederhalter (links) und Rollenniederhalter (rechts)

6.1.1.2 Niederhalter mit linienförmiger Kontaktzone

Wie zuvor besprochen erweist sich bei linienförmigen Kontaktkörpern als Niederhalter die beschränkte Eingriffszone als nachteilig. Durch die Abbildung der Kontaktkörper am Niederhalter mit versetzten Kontaktrollen kann der Eingriffsbereich jedoch vergrößert werden (vgl. Abbildung 6-7). Für die Untersuchungen im Folgenden wird ein Niederhaltesystem vorgeschlagen, welches aus drei Kontaktkörpern besteht, wobei an der Profilunterseite zwei in Profilierrichtung hintereinandergeschaltete Kontaktrollen angreifen. Zwischen diesen befindet sich die innere Kontaktrolle, welche, je nach Ausführung, verfahrbar gestaltet werden muss, um die Niederhalterkraft nahe dem Profilschenkel in das Profil einzubringen. Um den Effekt von Niederhaltern auf die Profilgeometrie aufzuzeigen, werden Niederhalter im Simulationsprozess vor und hinter den flexiblen Umformstufen 3 bis 5 in der Simulation eingesetzt. Der verwendete Niederhalter besitzt quer zur Vorschubsrichtung eine translatorische Verschiebbarkeit kombiniert mit der Rotation um die Anlagenhochachse. Die Freiheitsgrade sind somit mit denen der flexiblen Profiliergerüste vergleichbar. Das Layout der simulierten Anlagenkonfiguration ist in Abbildung 6-7 dargestellt, wobei die letzte Umformstufe unter Annahme der Symmetrie des Bauteils nur einseitig eingeformt wird (vgl. 4.1.3).

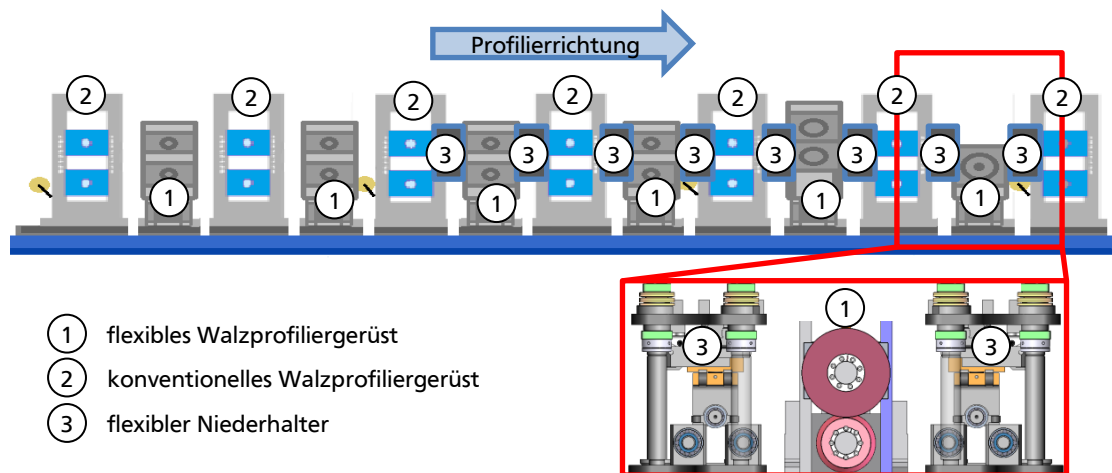


Abbildung 6-7: Layout der Gesamtanlage mit Niederhaltern in den letzten drei Umformstufen

Der Einfluss von Niederhaltern auf die Bodenverwölbung in der Simulation ist in Abbildung 6-8 dargestellt. Eine deutliche Verbesserung in der Maßhaltigkeit ist hierbei feststellbar. Die Verwölbung kann mit Verwendung breitenveränderlicher Niederhalter im Aufweitungsbereich auf 1,15 mm reduziert werden. Ohne den Einsatz von Niederhaltern liegt diese bei 3,7 mm.

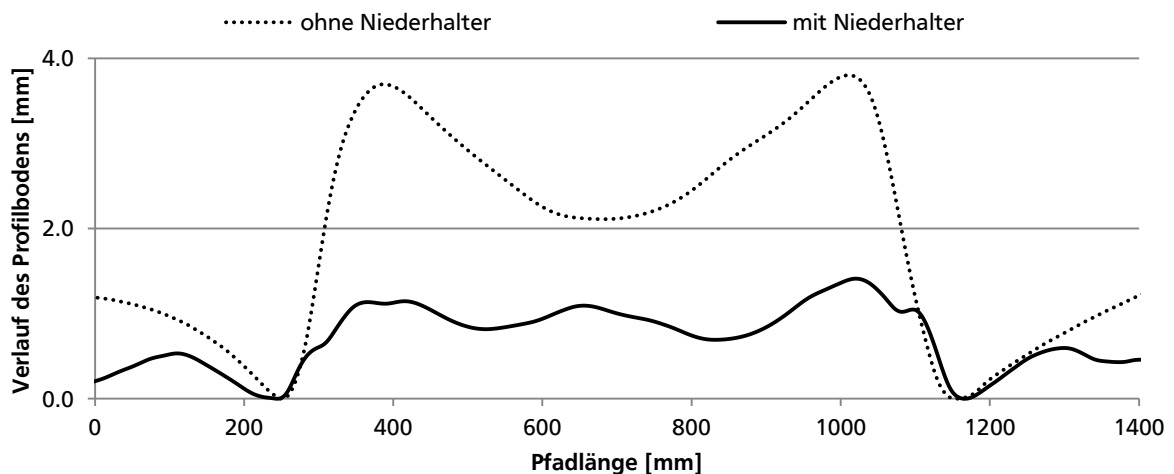


Abbildung 6-8: Verwölbung des Profilbodens bei der Zielgeometrie ohne und mit Niederhalter.

Dies begründet sich aus dem deutlichen Anstieg der Längsdehnungen in den Profilschenkeln. Abbildung 6-9 zeigt vergleichend den Verlauf der Längsdehnungen am Profilschenkel in einer Höhe von 32 mm mit und ohne eingesetztem Niederhalter. Der Anstieg der Längsdehnungen erlaubt eine bessere Abbildung der Punkte B auf B', wodurch die lokalen konkaven und konvexen Krümmungen im Übergangsbereich reduziert werden (vgl. Abbildung 2-9). Speziell in den Druckbereichen können die Längsdehnungen erheblich gesteigert werden, was sich aus einer besseren Abstützung des Profils gegen ein Absenken während des Profilierens erklären lässt.

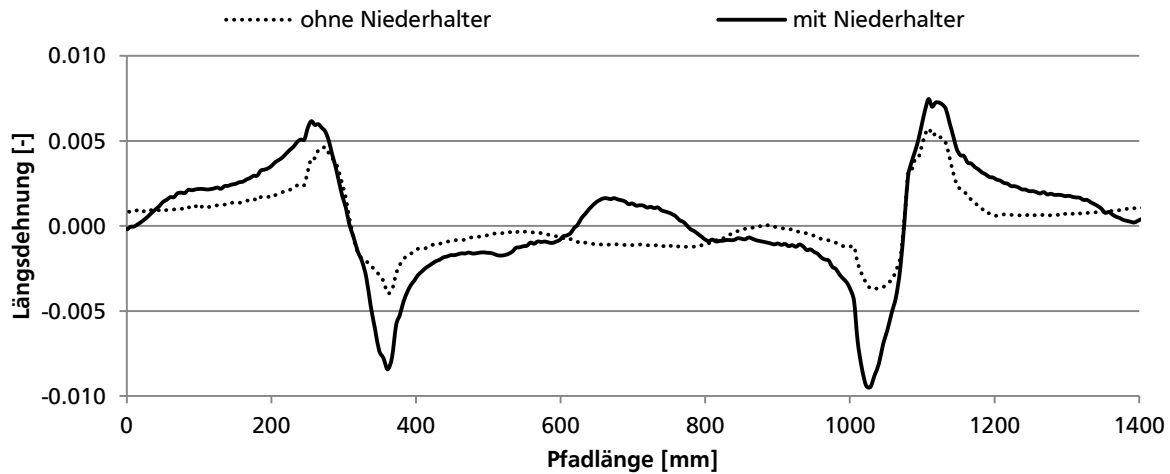


Abbildung 6-9: Längsdehnung im Profilschenkel bei der Zielgeometrie ohne und mit Niederhalter.

Um den Effekt der Niederhalter zu bewerten, werden neben der resultierenden Geometrie des Profilbodens und den Längsdehnungen am Profilschenkel die Kraftverläufe in den einzelnen Stufen ausgewertet. Je nach Betrag der Reaktionskräfte kann auf die Wirkung des Niederhalters geschlossen werden.

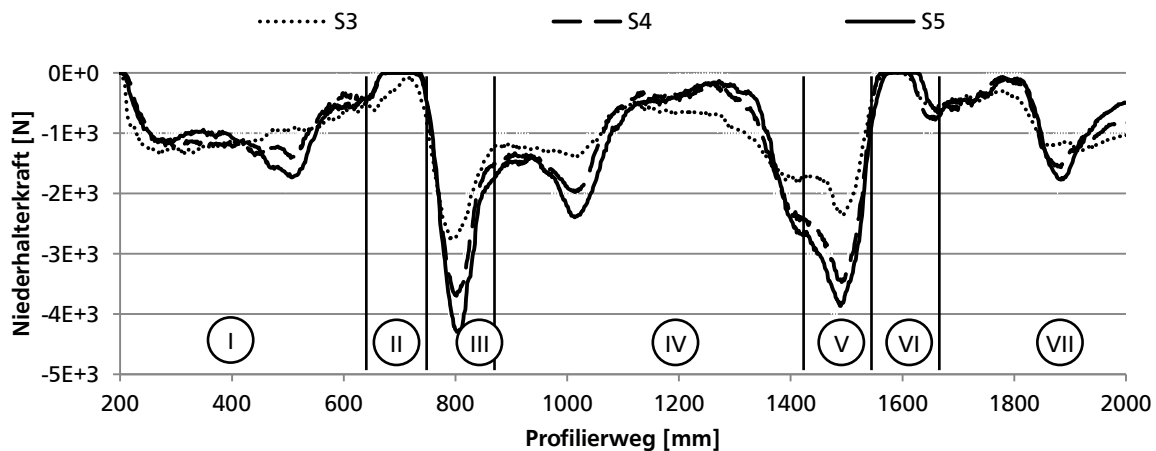


Abbildung 6-10: Kraftverläufe an der inneren Niederhalterrolle während der Einförmung in den Stufen 3, 4 und 5

Abbildung 6-10 zeigt die Verläufe der Kräfte an der eingangsseitigen inneren Niederhalterrolle in Anlagenhochrichtung (z-Richtung) während der Einförmung in den Stufen 3, 4 und 5. Erkennbar sind die verschiedenen Bereiche des Profils und die hieraus resultierenden Niederhalterkräfte. Im schmalen Profilabschnitt (I) ergeben sich noch geringe Niederhalterkräfte von maximal 1800 N. Diese fallen auf null zurück, wenn das Profil im Zugbereich (II) eine konkave Krümmung erfährt und steigt im Druckbereich (III) auf den Maximalwert an. Hier wird der hauptsächliche Niederhaltereffekt von der inneren Niederhalterrolle aufgebracht. Nach dem breiten Profilabschnitt (IV) wiederholen sich die

Kraftverläufe im Verjüngungsbereich ((V) und (VI)) mit der Maximalkraft im Druckbereich und einem Nullabfall im Zugbereich, bevor der Niederhalter mit dem schmalen Profilbereich (VII) in Eingriff ist. Erkennbar ist, dass die Kräfte am Niederhalter in fortgeschrittener Profilierstufe ansteigen. So liegen die maximalen Niederhalterkräfte beim Niederhalter in der fünften Umformstufe im vorliegenden Fall um ca. 65% über denen in der dritten Stufe. Somit zeigt sich, dass gerade in den letzten Umformstufen effektive Einsatzmöglichkeiten für Niederhalter liegen.

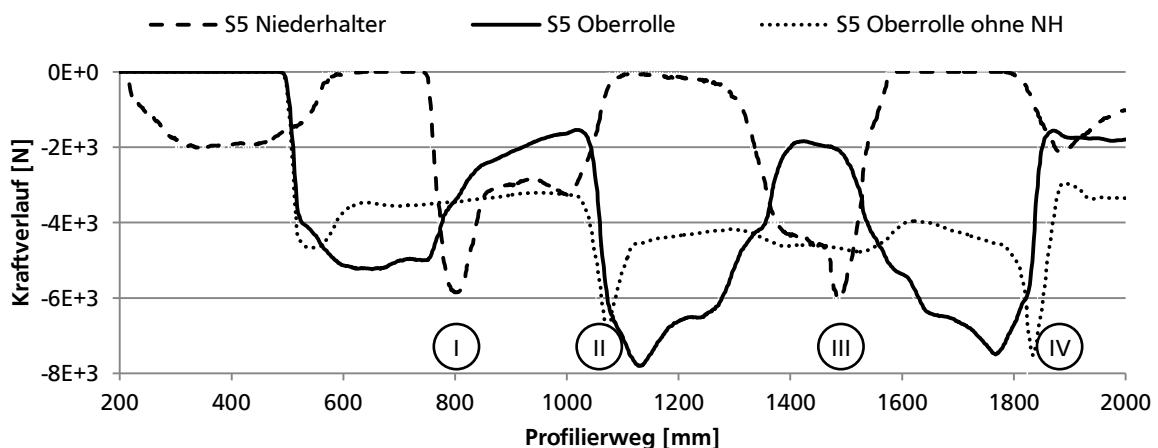


Abbildung 6-11: Kraftverläufe an der eingangsseitigen inneren Niederhalterrolle und der Oberrolle beim Einsatz eines Niederhalters in der fünften Umformstufe und Kraftverlauf an der Oberrolle ohne Niederhalter

Abbildung 6-11 zeigt beispielhaft die Verläufe an der eingangsseitigen inneren Niederhalterrolle und der Oberrolle in der Profilierstufe 5. Im vorliegenden Fall wurde nur ein Niederhalter vor und hinter dem flexiblen Gerüst in der fünften Stufe eingesetzt. Im Vergleich hierzu ist der Kraftverlauf ohne Niederhalter abgebildet. Es zeigt sich ein deutlich unterschiedlicher Verlauf der Kräfte an den Oberrollen während der Einformung. Während ohne Niederhalter zwei deutliche Kraftpeaks ((II) und (IV)) in den Übergangsbereichen auftreten, sind diese beim Einsatz von Niederhaltern in der Aufweitung verzögert bzw. in der Verjüngung vorgezogen. Es ergeben sich weiterhin deutliche Änderungen an der Oberrollenkraft, wenn die Niederhalter in den Druckbereichen ihr Kraftmaximum ((I) und (III)) erfahren. Hier fällt die Kraft an der Oberrolle deutlich ab. Aus diesem Absenken der Reaktionskraft an der Oberrolle kann geschlossen werden, dass ein Anteil des Kraftflusses im Niederhalter stattfindet. Die Oberrolle wird somit entlastet und ein Teil der Einformung wird durch die Niederhalter übernommen.

6.1.2 Einfluss der Querverfahrbewegung am Niederhalter

Wie in 2.1.3 gezeigt müssen beim flexiblen Walzprofilieren in den Übergangsbereichen deutliche Längsdehnungen in die Profilschenkel eingebracht werden. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Ebenheit des Profilbodens und der am Hutprofil erreichten Längsdehnungen in den Profilschenkeln ist weiterhin aus Abbildung 6-8 und Abbildung 6-9 ersichtlich. Um das flexible Profil im Übergangsbereich in Position zu halten und so notwendige Längsdehnungen in die Profilschenkel einzubringen, werden Niederhalter vor und hinter den flexiblen Gerüsten eingesetzt. Hierbei kann die Außenseite der Zielgeometrie mit veränderlichem Querschnitt über der gesamten Profilbreite durch die unteren Niederhalterrollen unterstützt werden, wohingegen auf der Innenseite der Kontaktbereich von der konstruktiven Umsetzung der Niederhaltereinheit abhängig ist.

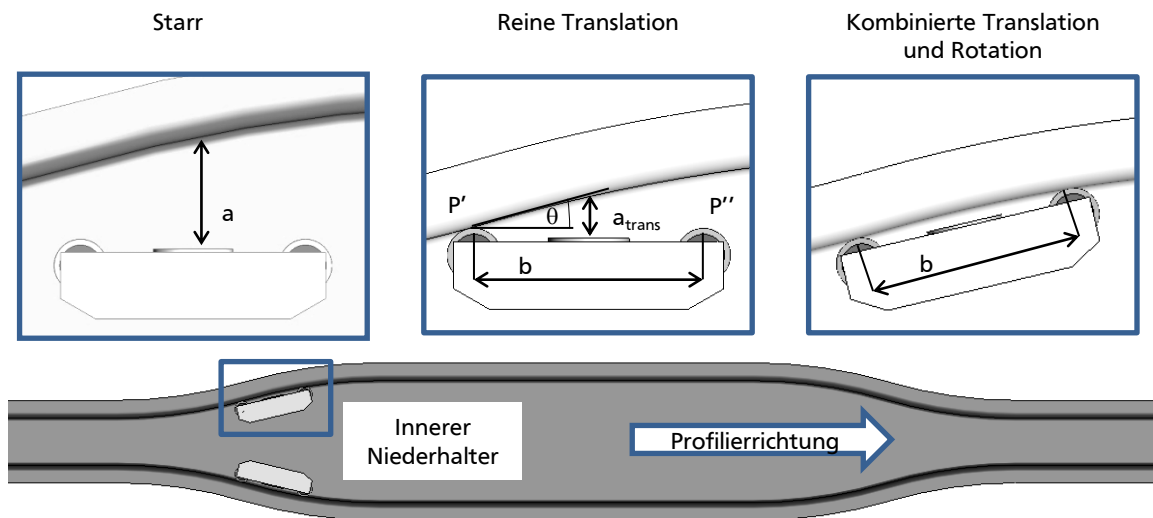


Abbildung 6-12: Abstände der Niederhalterkontakte zum Biegeradius bei reiner Translation und kombinierter Translation und Rotation des inneren Niederhalterkörpers

Abbildung 6-12 zeigt die prinzipiellen Möglichkeiten, an welchen Positionen der innere Kontaktkörper die Niederhalterkraft während des Profilvorgangs im Übergangsbereich in das Profil einbringen kann. Je nach konstruktiver Umsetzung ergeben sich unterschiedliche Abstände der Kontaktzone zum Profilschenkel. Bei der Verwendung eines starren Niederhaltesystems muss bei der herzustellenden Profilform eine durchgängige Flucht durch das Profil vorhanden sein. Somit folgt, dass bei einem starren Niederhaltesystem die innere Abstützung nur über der schmalen Profilbreite erfolgen kann, wodurch die Krafteinleitung von der Profillinenseite im aufgeweiteten Bereich hauptsächlich über den Profilboden erfolgt. Im Falle eines starren, also nicht verfahrbaren, inneren Niederhalters ergibt sich der maximale Abstand a_{starr} entsprechend der Profilaufweitung zu:

$$a_{starr} = 2 R (1 - \cos \theta)$$

Formel 6-2

Der Abstand nimmt während des Durchlaufs des Übergangsbereichs folglich zu, bis im aufgeweiteten Bereich das Maximum erreicht ist. Hier bleibt der Abstand a_{starr} über den gesamten Bereich erhalten. Bei der Umsetzung eines quer zur Profilierrichtung rein translatorisch verfahrbaren Niederhalters, kann dieser der Profilkontur folgen. Allerdings ergibt sich aufgrund der räumlichen Ausdehnung des Kontaktkörpers, wie in Abbildung 6-12 gezeigt, der Abstand der Krafteinleitung von Kontaktbereich zum Profilschenkel entsprechend der Position während der Querschnittsänderung. Der Kontaktbereich kann während der Aufweitung dem Profilverlauf nur verzögert und im Bereich der Verjüngung vorausseilend folgen, da der Kontaktpunkt P' in der Aufweitung und P'' im Bereich der Verjüngung den Kontakt am Profilschenkel repräsentiert. Dementsprechend ergibt sich der maximale Abstand a_{trans} im Bereich des Wechsels von Zug- nach Druckbereich. In erster Näherung kann der Abstand a_{trans} für große Übergangsradien zu

$$a_{\text{trans}} = \frac{b}{2} \tan \theta \quad \text{Formel 6-3}$$

angenommen werden. Der geringste Abstand zwischen Krafteinleitungszone und Profilschenkel lässt sich mittels kombiniert translatorischer und rotatorischer Verfahrbewegung realisieren. Hierbei folgen die Kontaktpunkte P' und P'' dem Profilschenkel und der maximale Abstand der Krafteinleitung ergibt sich somit aus der Sekante im Druckbereich mit dem Punktabstand b als Sehne zu:

$$a_{\text{flex}} = R_{\text{druck}} - \sqrt{R_{\text{druck}}^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \quad \text{Formel 6-4}$$

Hieraus zeigt sich, dass im Speziellen bei großen Aufweitungsverhältnissen, also großen Übergangswinkeln, deutliche Abstände zwischen Kontaktzone des inneren Niederhalters und dem Profilschenkel auftreten können. Im Falle der Zielgeometrie kommt es bei einem Übergangswinkel von $7,5^\circ$, einem Konturradius von 500 mm und einem Abstand $b = 80$ mm der Kontaktpunkte P' und P'' zu $a_{\text{starr}} = 8,5$ mm, $a_{\text{trans}} = 5,27$ mm und $a_{\text{flex}} = 1,6$ mm. Hieraus zeigt sich trotz verhältnismäßig geringer Aufweitung schon ein deutlicher Unterschied zwischen den einzelnen Möglichkeiten der konstruktiven Umsetzung der Niederhalter.

Da die zusätzlichen Freiheitsgrade flexibel verfahrbarer Niederhalter den Invest für eine flexible Profilieranlage weiter erhöhen, soll untersucht werden, inwieweit sich ein starres Niederhaltersystem negativ auf die Profilform auswirkt. Aufgrund des Abstandes der Kontaktzone der inneren Niederhalter vom Profilschenkel kann es zu Formabweichungen beim Einformen der Übergangsbereiche kommen.

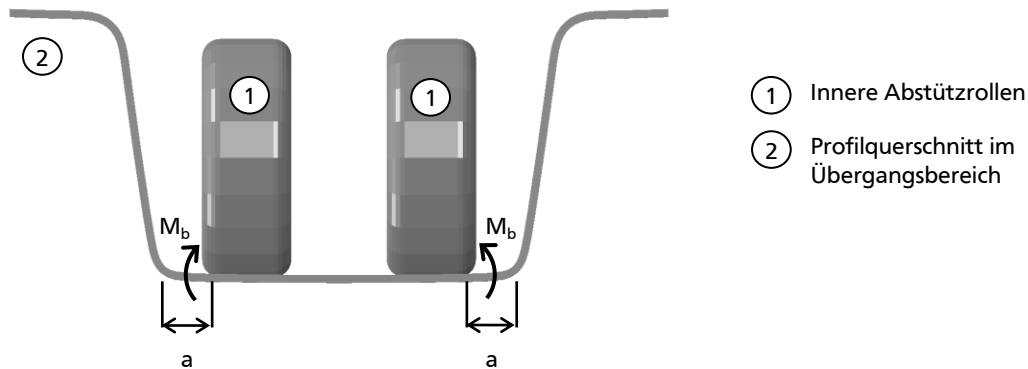


Abbildung 6-13: Biegemoment am nicht verfahrbaren Niederhalter im Übergangsbereich und dem daraus resultierenden Biegemoment um die inneren Abstützrollen

Wenn sich das Profil bei der Einförmung der Übergangsbereiche anhebt, kann ein Biegemoment um den äußeren Kontaktpunkt am Niederhalter auftreten (vgl. Abbildung 6-13). Hier besteht gerade bei Profilen mit geringer Blechdicke und hoch- oder höchstfesten Stahlgüten die Gefahr des Ausbildens einer ungewollten, plastischen Biegekante. Dies zeigt sich im formelmäßigen Zusammenhang für die Ermittlung des Biegemoments beim freien Biegen eines endlichen Blechstreifens der Breite a im V-Gesenk [OE63]. Hier ergibt sich das Biegemoment zu:

$$M_b = k_f \frac{a t^2}{6} \quad \text{Formel 6-5}$$

Dabei ist t die Blechstärke des verwendeten Bleches mit der Fließspannung k_f . Die für das Biegemoment notwendigen eingebrachten Kräfte resultieren aus den Längsspannungen im Profilschenkel und Profilflansch. Wenn das Profil mit dem in Höhenrichtung konvexen Druckbereich den Niederhalter durchläuft, erreichen die Niederhalterkräfte ihr Maximum (vgl. Abbildung 6-10). Hier kann angenommen werden, dass die notwendigen Kräfte zum Erreichen der notwendigen Längsdehnungen proportional von der Blechdicke abhängen. Als Hebelarm, mit dem die maximale Niederhalterkraft das Biegemoment in den Profilboden induziert, kann beim breitenveränderlichen Profil die Aufweitung herangezogen werden. Es zeigt sich nach Formel 6-5, dass durch die quadratische Abhängigkeit des Biegemoments von der Blechdicke t gerade bei dünnen Blechen ein geringes Biegemoment zum Ausbilden einer plastischen Biegekante führt.

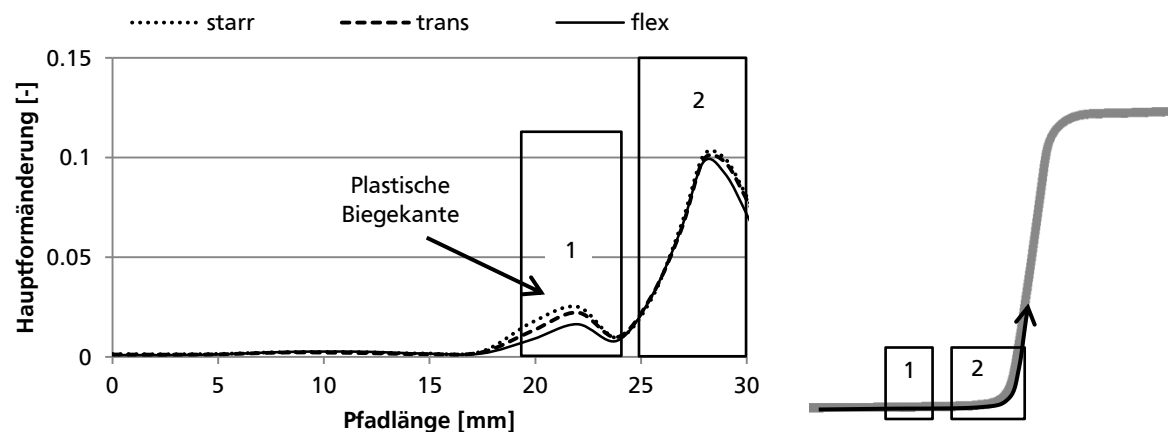


Abbildung 6-14: Hauptformänderung an der Profilaussenseite mit starrem, translatorisch und kombiniert translatorisch rotatorisch verfahrbaren Niederhaltern

Abbildung 6-14 zeigt den Effekt unterschiedlicher Niederhalterausführungen auf die ungewollte plastische Biegekante im Profilboden. Beim Profilieren der Zielgeometrie aus ZStE340 in 1,35 mm mit einem Übergangsradius von 500 mm, kommen Niederhalter in den Profilierstufen 3 bis 5 vor und hinter der flexiblen Profilierstufe zum Einsatz. Die Niederhalterkonfiguration besteht hierbei jeweils aus 2 Abstützrollen an der Profilunterseite im Abstand von $f = 100$ mm und dazwischenliegenden inneren Kontaktrollen. Die inneren Kontaktkörper sind in den zuvor genannten Varianten der Freiheitsgrade ausgeführt (vgl. Abbildung 6-12). Während der Einförmung wird der Profilschenkel im aufgeweiteten Bereich zusätzlich zum eigentlichen Biegeradius nach innen gebogen. Die Verwölbungen vom Profilboden erfahren hierdurch eine Verstärkung an den Flanschen, wodurch in den Übergangsbereichen eine zusätzliche Abweichung von der Zielgeometrie auftritt. Die Verläufe zeigen jedoch auch, dass im aufgeweiteten Bereich diese plastische Biegekante durch den Einsatz von verfahrbaren Niederhalter nur reduziert und nicht komplett vermieden werden kann, wobei das beste Ergebnis mit kombiniert translatorisch rotatorischer Bewegung erzielt werden kann.

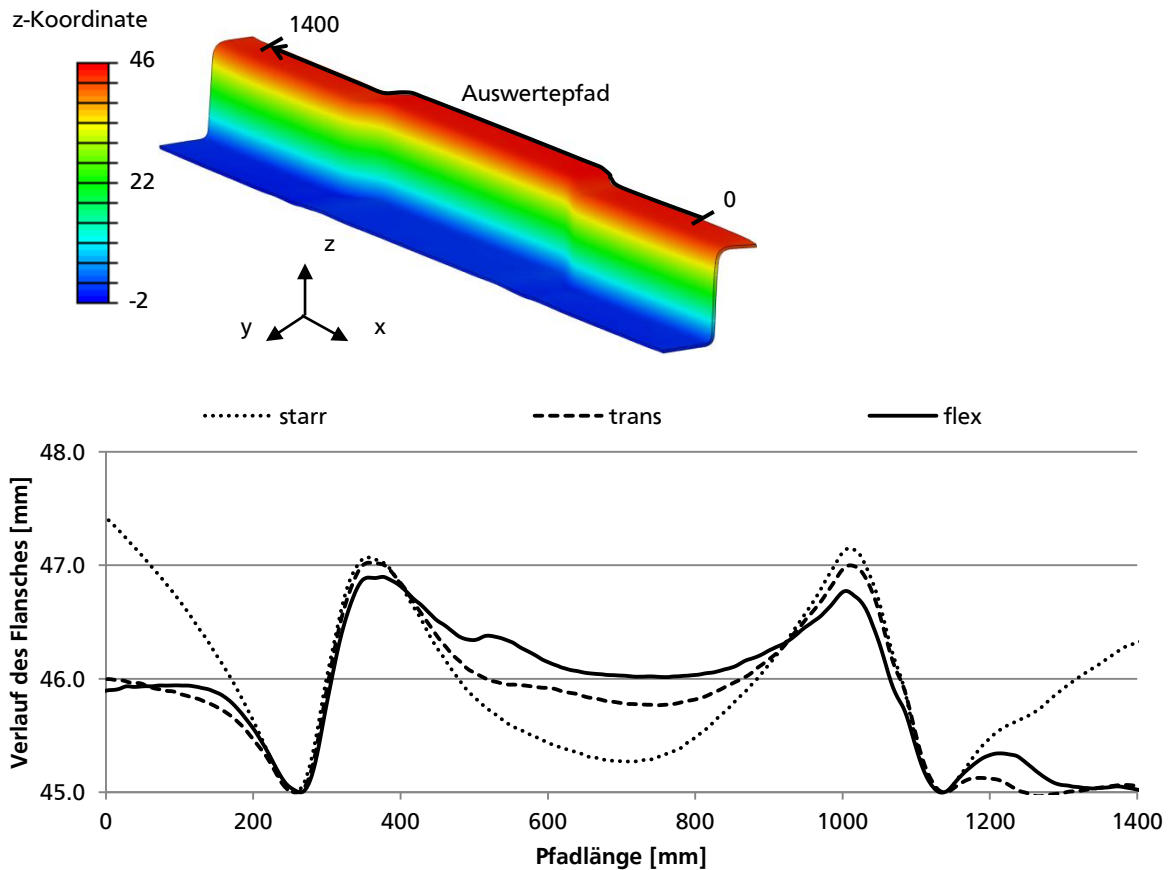


Abbildung 6-15: Verwölbung am Flansch in z-Richtung mit starrem, quer translatorisch und quer kombiniert translatorisch rotatorisch verfahrenbaren Niederhaltern

Darüber hinaus zeigt sich in Abbildung 6-15, dass im breiten Bereich der Zielgeometrie zusätzlich eine lokale Bogenbildung auftritt. Dies lässt sich durch das schlechtere Abbilden des Zielbiegewinkels im aufgeweiteten Bereich erklären. Während beim mit kombiniert verfahrenbaren Niederhaltern gefertigten Profil der Biegewinkel über den aufgeweiteten Bereich konstant bleibt, ändert sich dieser über den Aufweitungsbereich mit starren und rein translatorisch verfahrenbaren Niederhaltern. Der Effekt der ungewollten Biegekante hat seinen hauptsächlichsten Einfluss in den Übergangsbereichen, wodurch hier ein größerer Winkel zwischen ebenem Boden und Schenkel entsteht. In der Mitte des breiten Bereichs geht dieser dann wieder auf den Zielbiegewinkel zurück. Diese Änderung des Winkels zwischen Boden und Schenkel führt für das Gesamtprofil zu einem Längsbogen im aufgeweiteten Bereich. Hierdurch werden außerdem die notwendigen Längsdehnungen, speziell bei starren Niederhaltern, reduziert (vgl. Abbildung 6-16).

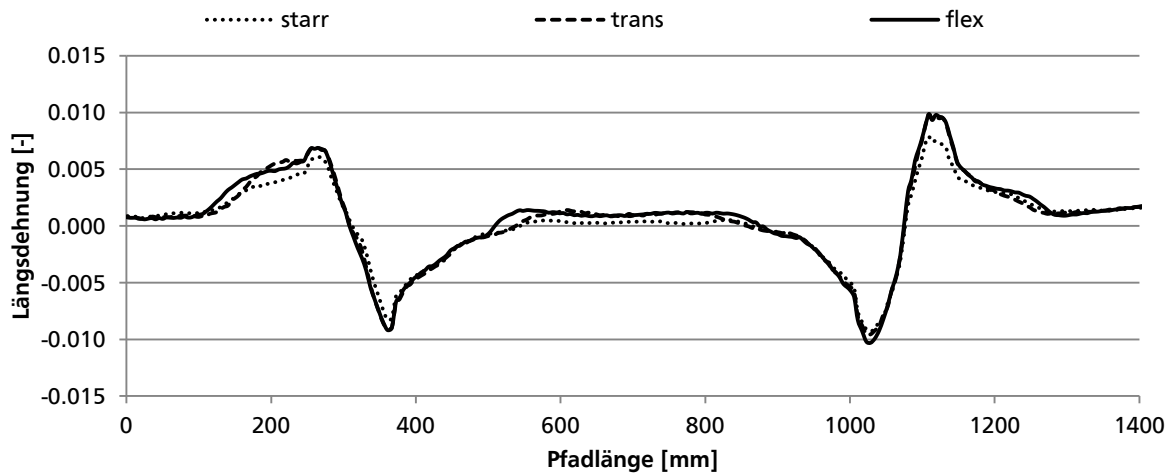


Abbildung 6-16: Längsdehnungen am Profilschenkel mit starrem, quer translatorisch und quer kombiniert translatorisch rotatorisch verfahrbaren Niederhaltern

6.1.3 Ein- und ausgangsseitiger Niederhalter

Die bisherigen Betrachtungen basieren auf einer Werkzeugkonfiguration mit Niederhaltern am Ein- und Ausgang der jeweiligen flexiblen Profilierstufe. Im Folgenden wird der Einfluss betrachtet, wenn Niederhalter nur ein- oder ausgangsseitig der Umformgerüste eingesetzt werden. Hierdurch kann die Komplexität einer Gesamtanlage zum flexiblen Walzprofilieren beeinflusst werden. Im Rahmen der Untersuchungen wird die Referenzgeometrie mit einem Konturradius von 500 mm und dem Material ZStE340 in 1,35 mm Wandstärke herangezogen. Die Niederhalter werden in den Umformstufen 3 bis 5 eingesetzt, wobei Niederhalter am Eingang der Profilierstufe bzw. an deren Ausgang zum Einsatz kommen (vgl. Abbildung 6-1). Als Referenz dient die Anlagenkonfiguration mit beidseitigen Niederhaltern.

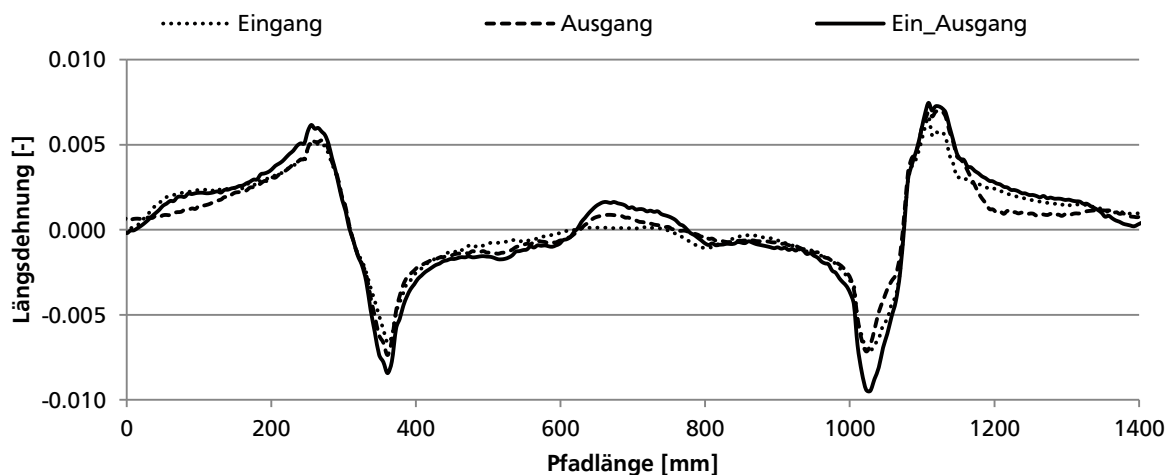


Abbildung 6-17: Längsdehnungen am Profilschenkel mit ein- und ausgangsseitigen Niederhaltern und gesamter Konfiguration in den Profilierstufen 3 - 5

Abbildung 6-17 zeigt den Verlauf des Profilbodens in der Gegenüberstellung. Es wird deutlich, dass der beidseitige Einsatz von Niederhaltern die höchsten Längsdehnungen in die Profilschenkel einbringt. Dies resultiert auch, wie in Abbildung 6-18 ersichtlich, in den geringsten Abweichungen von einem ideal ebenen Profilboden. So kommt es im Bereich der Aufweitung zu einer Verwölbung von 1,15 mm bzw. in der Verjüngung von 1,4 mm. Dem gegenüber stehen bei ausgangsseitigem Einsatz von Niederhaltern 1,6 mm bzw. 1,53 mm und bei eingangsseitigem Einsatz 2,2 mm bzw. 2,49 mm. Gerade für das Erreichen hoher Genauigkeitsanforderungen ergibt sich die maximale Konfiguration mit Niederhaltern an Ein- und Ausgangsseite der flexiblen Umformgerüste als notwendig. Es zeigt sich hieraus allerdings auch, dass die ausgangsseitigen einen größeren Einfluss auf die Verwölbung des Profilbodens haben als die eingangsseitigen Niederhalter.

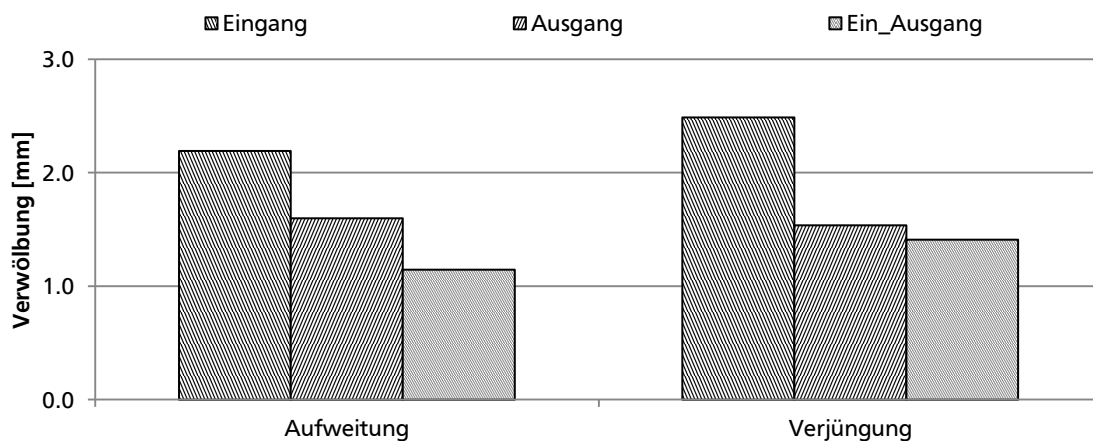


Abbildung 6-18: Verwölbung des Profilbodens mit ein- und ausgangsseitigen Niederhaltern und gesamter Konfiguration in den Profilerstufen 3 - 5

6.1.4 Variation der Niederhalteranzahl in der Anlage

Für die Planung einer Anlage zum flexiblen Walzprofilieren haben die Auswahl des Konzeptes und die der eingesetzten Komponenten entscheidenden Einfluss auf die entstehenden Kosten. Dass der Einsatz von Niederhaltern in einer flexiblen Walzprofilieranlage die Qualität der Bauteilgeometrie entscheidend beeinflussen kann, konnte in 6.1.1 gezeigt werden. Aussagen über den Effekt von Niederhaltern in der jeweiligen Stufe sollen im Folgenden die notwendige Komplexität einer solchen Anlage klären.

An dem grundlegenden Simulationsmodell wurde hierzu die Anzahl der Niederhalter während der Umformung variiert. Als Einförmstrategie kommt die simultane Einförmung von Profilschenkel und Profilflansch, wie in 6.2.1 beschrieben, zum Einsatz. Untersucht wird der Einfluss der Niederhalter an der Zielgeometrie (1) mit einem Übergangsradius von 500 mm. Die eingesetzten Niederhalter werden in einem Abstand von jeweils 300 mm vor bzw. hinter

der Einformstufe eingesetzt. Die unteren Niederhalterrollen sind mit gleichem Abstand von jeweils 50 mm vor und hinter der inneren Niederhalterrolle angeordnet.

Bei ausschließlichen Einsatz von Niederhaltern in der letzten Umformstufe zeigt sich beim Verlauf des Profilbodens eine deutlich höhere Längskrümmung des Profils. Um den Effekt auf die Bodenverwölbung bewerten zu können, wird, wie unter 4.1.3 beschrieben, die Längskrümmung rechnerisch auf das Niveau der Verläufe der Varianten mit mehr Niederhaltern gebracht.

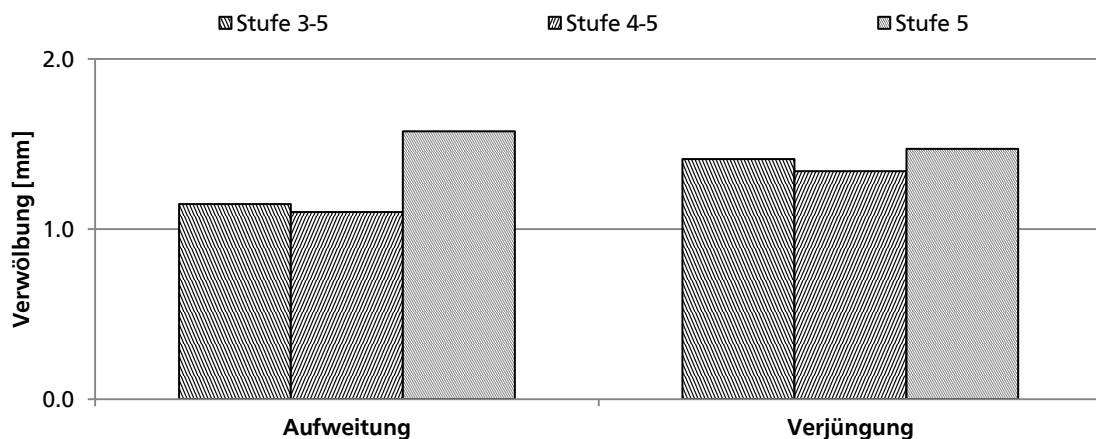


Abbildung 6-19: Verwölbung des Profilbodens bei der Zielgeometrie mit unterschiedlicher Anzahl von Niederhaltern in der Anlage

Abbildung 6-19 zeigt den Einfluss der Anzahl der in der Anlage eingesetzten Niederhalter auf die erreichte Bodenverwölbung der flexibel profilierten Zielbauteile. Eingesetzt wurden Niederhalter in den letzten drei, den letzten zwei und nur der letzten Profilierstufe. Während sich durch den Einsatz von Niederhaltern in den Stufen 50°, 70° und 80° bzw. 70° und 80° nahezu identische Ergebnisse hinsichtlich der Profilform ergeben, zeigt der Einsatz von Niederhaltern nur in der letzten Profilierstufe stärkere Abweichungen von der Zielgeometrie, speziell im Bereich der Aufweitung. Unterstrichen wird dieses Ergebnis auch durch den Verlauf der Längsdehnungen an den Profilschenkeln (Abbildung 6-20). Die erreichten Längsdehnungen bei ausschließlichen Einsatz von Niederhaltern in der letzten Profilierstufe liegen im Maximalwert im Verjüngungsbereich um ca. 20% unterhalb von dem mit Niederhaltern in den letzten drei Umformstufen.

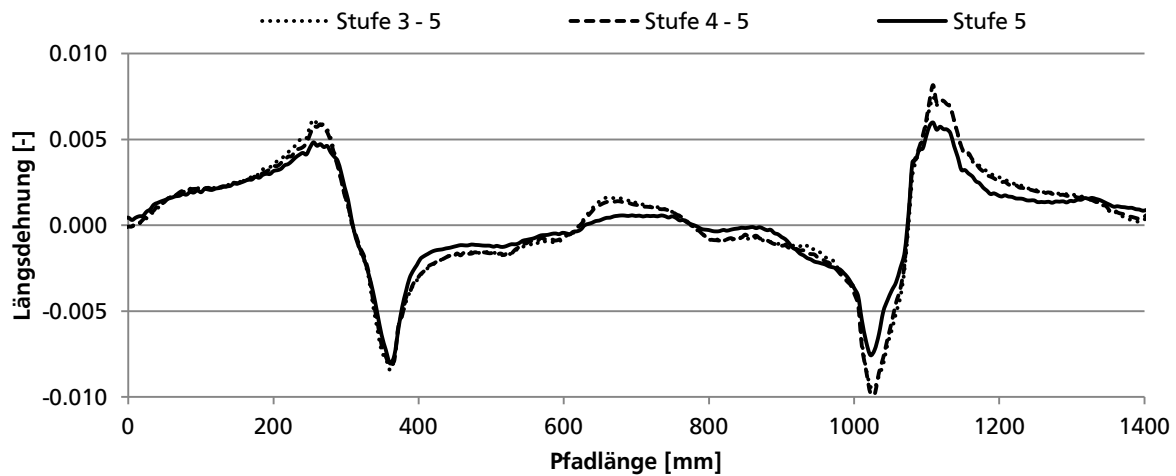


Abbildung 6-20: Längsdehnung an den Profilschenkeln bei der Zielgeometrie mit unterschiedlicher Anzahl von Niederhaltern in der Anlage

Weiterhin lassen sich aus Abbildung 6-19 und Abbildung 6-20 Rückschlüsse hinsichtlich der maximal notwendigen Zahl an Niederhaltern in der Anlage ziehen. Aufgrund der nahezu identischen Verläufe des Profilbodens und der Längsdehnungen erscheint der Einsatz weiterer Niederhalter in den Umformstufen 1 und 2 als nicht notwendig. Diese These wird gestützt durch Rückschlüsse aus den Profilbodenverläufen in 5.3, wo sich gezeigt hat, dass sich die charakteristische Bodenverwölbung erst ab der dritten Profilierstufe deutlich einstellt.

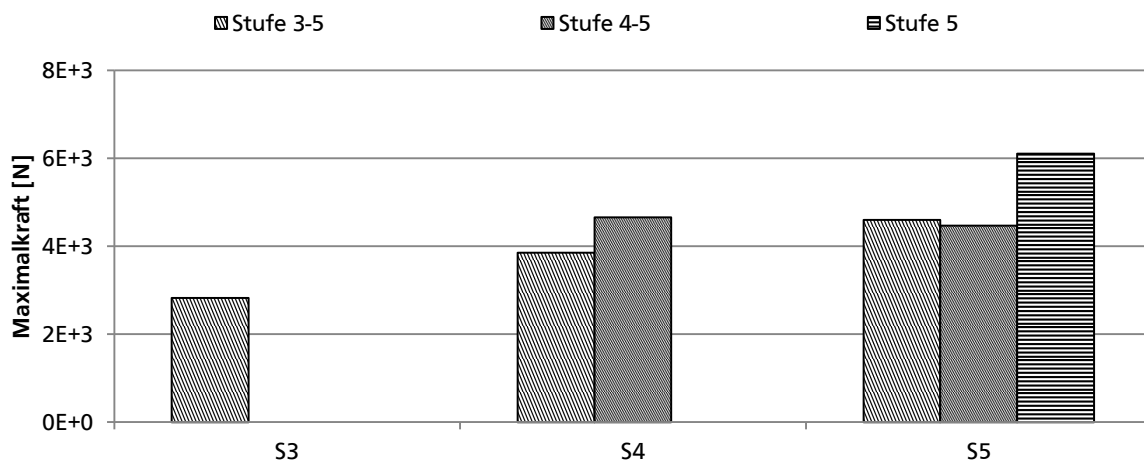


Abbildung 6-21: Maximale Niederhalterkraft mit unterschiedlicher Anzahl von Niederhaltern in der Anlage

Nach Abbildung 6-21 zeigt sich, dass sich die maximalen Niederhalterkräfte in der letzten Umformstufe kaum unterscheiden, wenn in den letzten drei bzw. in den letzten zwei Umformstufen Niederhalter zum Einsatz kommen. Hieraus lässt sich somit auch die nahezu gleiche Profilgeometrie hinsichtlich der Bodenverwölbung erklären. Kommen Niederhalter jedoch nur in der letzten Umformstufe zum Einsatz, liegen die Kräfte um ca. 35% über denen,

wenn zuvor schon Niederhalter im Einsatz waren. Hier müssen dann zu hohe Kräfte eingebracht werden, da die Profilgeometrie schon in den vorigen Stufen ohne Niederhalter definiert wurde.

6.1.5 Position des Niederhalters relativ zum flexiblen Gerüst

Da das Profil bei der Einformung zwischen den einzelnen Stufen versucht, die energetisch günstigste Eigenform anzunehmen und so den Längsdehnungen auszuweichen, hat die Position der Niederhalter einen Einfluss auf die resultierende Profilgeometrie. So ist bei einem zu großen Abstand der Niederhalter vom flexiblen Walzprofiliergerüst zu vermuten, dass deren Einfluss auf die Einformung zu gering und sich somit größere nicht unterstützte Bereiche ergeben. Bei einem zu geringen Abstand kann es dagegen zum einen zur Kollision mit dem flexiblen Gerüst während der Schwenkbewegung führen und zum anderen kann es zu einer zu geringen Abstützung des Profils kommen.

Zur Untersuchung des Effektes des Niederhalterabstandes werden Niederhalter in den Umformstufen 3 bis 5 vor und hinter der Einformstufe eingebracht und in Abständen von 200 mm und 300 mm zum flexiblen Gerüst positioniert. Die Simulationen werden auf Basis der Zielgeometrie (1) mit einem Konturradius $R = 500$ mm durchgeführt.

Wie in Abbildung 6-22 gezeigt hat der Abstand der Niederhalter einen deutlichen Einfluss auf die Profilgeometrie. Der verringerte Abstand vom Niederhalter zum Profiliergerüst resultiert in einer Reduktion der Profilbodenverwölbung. Während bei einem Abstand von 300 mm eine Verwölbung von 1,15 mm im Aufweitungsbereich auftritt, kann dieser Wert auf 0,9 mm bei einem Abstand von 200 mm reduziert werden. Bestätigt wird dieser Effekt auch durch einen Anstieg der Längsdehnungen im Profilschenkel (Abbildung 6-23). Im Übergangsbereich vom aufgeweiteten Querschnitt hin zum schmalen Querschnitt erhöht sich der Maximalwert der Längsdehnung sowohl im Zug- als auch im Druckbereich um ca. 20%. Ein vergleichbarer Anstieg ist auch im Aufweitungsbereich feststellbar, wobei hier die Maximalwerte unterhalb derer im Verjüngungsbereich liegen.

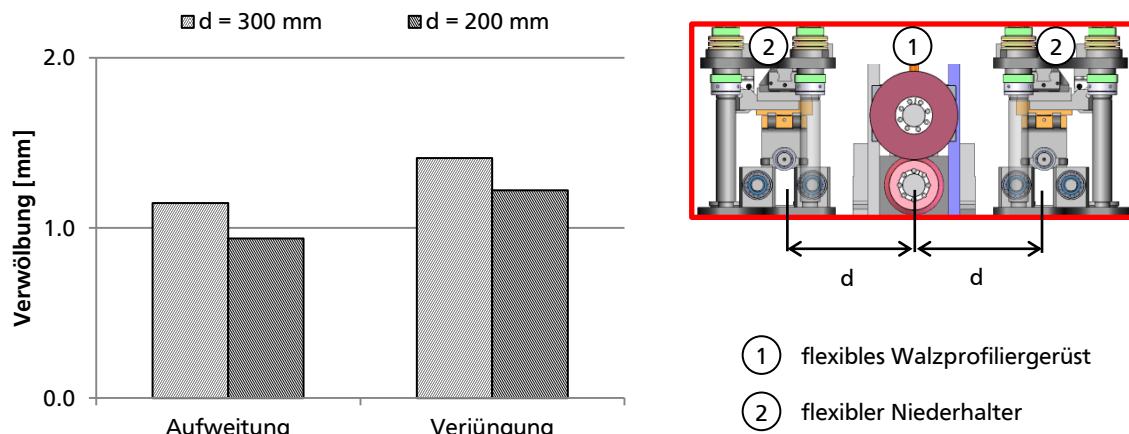


Abbildung 6-22: Verwölbung des Profilbodens mit Niederhalterabständen von 200 mm und 300 mm in den Stufen 3 bis 5

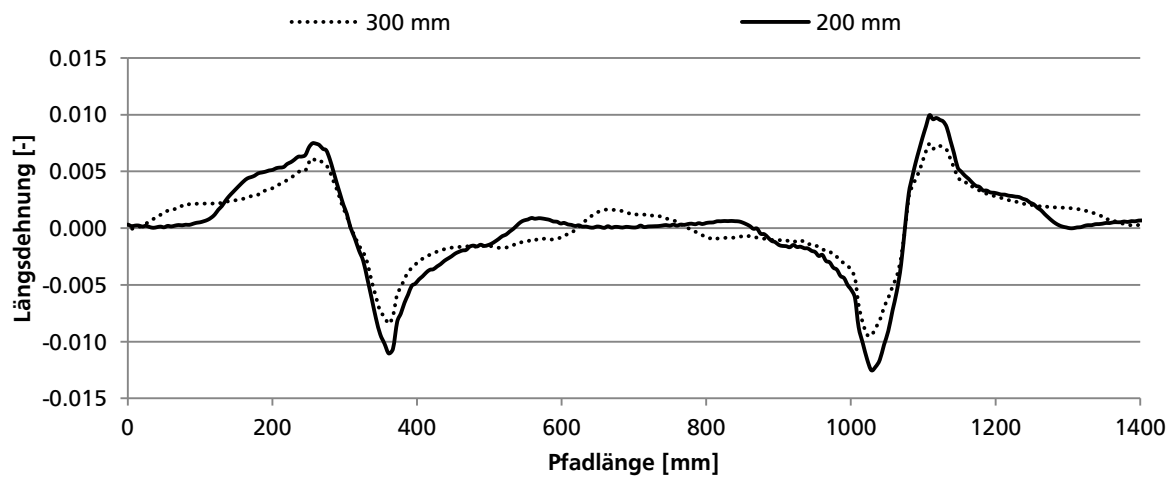


Abbildung 6-23: Längsdehnung am Profilschenkel mit Niederhalterabständen von 200 mm und 300 mm in den Stufen 3 bis 5

Beim Betrachten der Niederhalterkräfte zeigt sich, dass trotz des besseren Profilierungsergebnisses die Kräfte an den oberen Niederhalterrollen in der Umformstufe 5 mit einem Abstand von 200 mm geringer ausfallen als die, die bei einem Abstand von 300 mm auftreten (Abbildung 6-24).

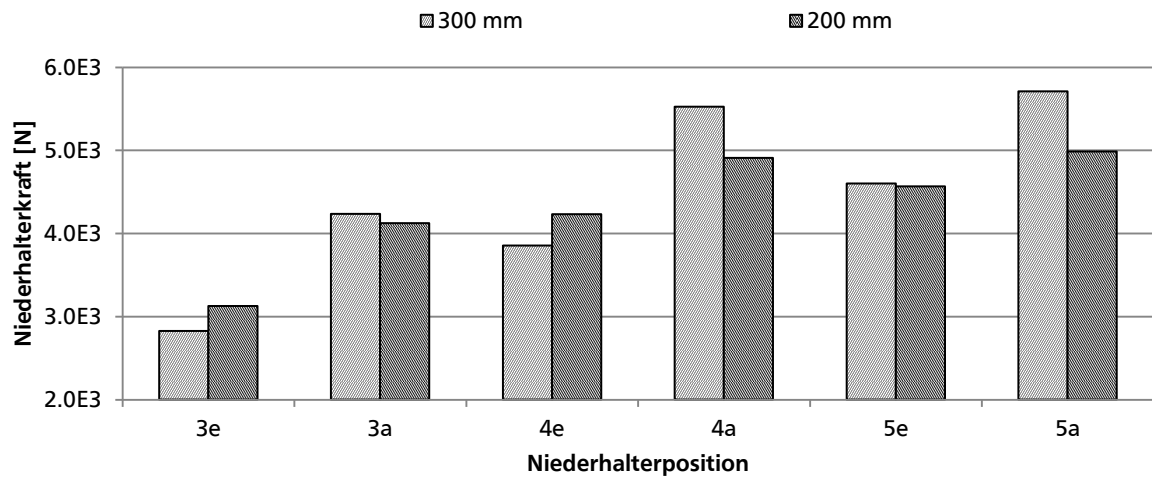


Abbildung 6-24: Maximalkräfte am Niederhalter mit Niederhalterabständen von 200 mm und 300 mm in den Stufen 3 bis 5

Die Kraftniveaus der Profilierrollen an der letzten Umformstufe zeigen das umgekehrte Verhalten. Hier liegt die Kraft an der Oberrolle bei einem Niederhalterabstand von 200 mm deutlich über dem Niveau der Oberrolle mit einem Niederhalterabstand von 300 mm (vgl. Abbildung 6-25). Dies lässt vermuten, dass sich der Ort der Umformung verlagert hat, wobei die Position des Niederhalters nahe der Umformstufe vorteilhafter für die Maßhaltigkeit des Bauteils ist.

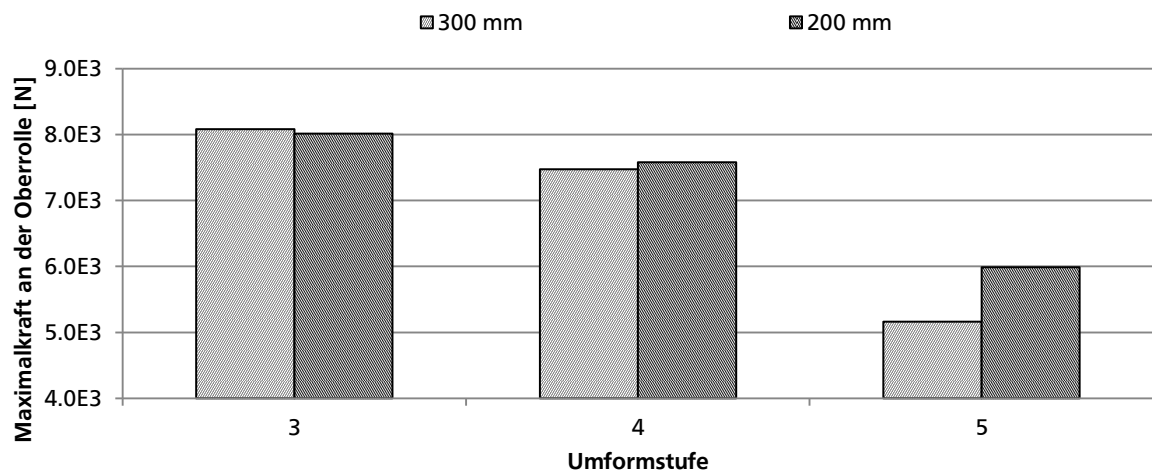


Abbildung 6-25: Maximalkräfte an der Oberrolle mit Niederhalterabständen von 200 mm und 300 mm in den Stufen 3 bis 5

6.1.6 Variation der Abstützung am Niederhalter

Das Niederhalterprinzip ist so gestaltet, dass als Kontaktkörper ein in Querrichtung verfahrbarer innerer Kontaktkörper zwischen zwei stationären Abstützrollen in Werkstückkontakt ist (vgl. 6.1.1). Die unteren Niederhalterrollen sind hierbei relativ zur oberen Kontaktrolle verschiebbar, wodurch der Abstützabstand zwischen den Kontaktkörpern einstellbar ist. Hierdurch kann die Kontaktpaarung im Niederhalter auf die Profilform eingestellt werden.

Bei der Zielgeometrie mit einem Übergangsradius von 500 mm geschieht die Aufweitung über einer Strecke von 122 mm. Die lokalen Extrema der Bodenverwölbung liegen ohne Verwendung eines Niederhalters im Bereich der Aufweitung ca. 140 mm bzw. im Bereich der Verjüngung 160 mm voneinander entfernt. Unter der Annahme, dass sich die Verwölbung aus einem konvexen und einem konkaven Bereich zusammensetzt, welcher jeweils mittels Krümmungsradius abgebildet werden kann, ergeben sich Krümmungsradien von ca. 1200 mm in den Übergangsbereichen. Die Abstützung dieser Bereiche durch den Niederhalter muss durch die Einstellungen der Niederhalterrollen zueinander gegeben sein. Als Abstände an den unteren Niederhalterrollen werden 100 mm und 60 mm eingestellt (vgl. Abbildung 6-26). Diese entsprechen den maximal einstellbaren Positionen am Niederhaltersystem. Wie schon in Abbildung 6-11 gezeigt zeichnen sich die Verläufe der Niederhalterkräfte an der inneren Niederhalterrolle durch ein Abfallen der Kraft im eingeformten Zugbereich aus. Die Maximalkraft wird dann während der Einförmung des Druckbereiches erreicht.

Der Einfluss des unteren Stützrollenabstands auf die Bodenverwölbung ist nur bei der Aufweitung des breitenveränderlichen Profils erkennbar. Bei der Verjüngung liegen die Verläufe des Profilbodens nahezu auf identischem Niveau. Allerdings ergibt sich bei unterschiedlichen Stützrollenabständen auch ein unterschiedlicher Abstand zwischen dem flexiblen Umformgerüst und der nächstgelegenen unteren Stützrolle. Da bei einem größeren Stützabstand der unteren Niederhalterrollen die nächstgelegene Stützrolle näher am flexiblen Gerüst liegt, kann hier auch eine reduzierte Bodenverwölbung von 1,15 mm statt 1,4 mm festgestellt werden (vgl. Abbildung 6-26). Bei der Verjüngung ergibt sich lediglich eine Reduktion von 1,55 mm bei 60 mm Stützrollenabstand auf 1,5 mm.

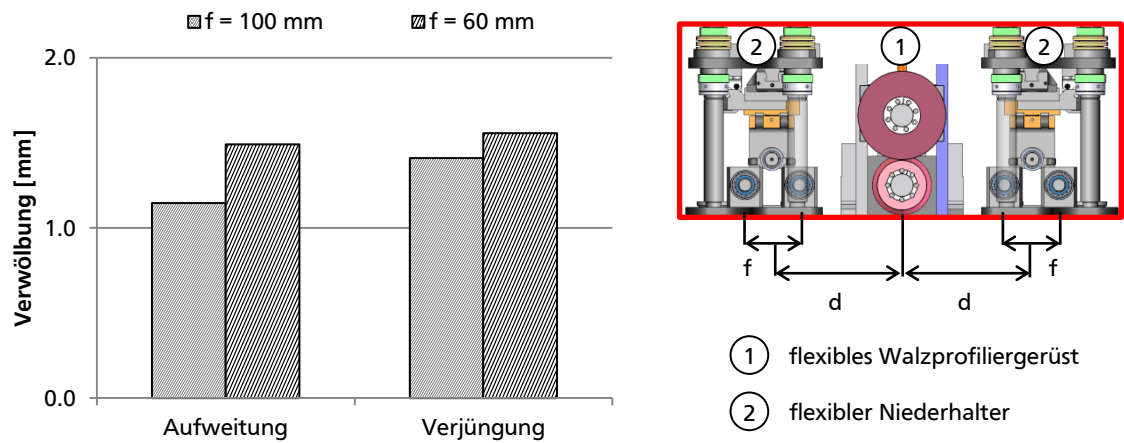


Abbildung 6-26: Verwölbung des Profilbodens bei der Zielgeometrie mit unterschiedlichen Abständen der unteren Stützrollen

6.2 Einflussmöglichkeiten mittels Werkzeuggestaltung, Werkstoff- und Geometrieparameter

6.2.1 Einfluss der Einformstrategie

Zur Optimierung der Geometrie beim Walzprofilieren ist die korrekte Auslegung der Profilblume unumgänglich. Wie in 2.1.2 dargestellt kann eine fehlerhafte Auslegung der Profilblume zu Bauteilfehlern wie beispielsweise Bandkantenwelligkeit oder Biegung um die Querachse führen.

Für die Gestaltung konventioneller Walzprofilierprozesse stehen unterschiedliche kommerzielle Softwarelösungen wie Copra FEA RF oder UBECO Profil zur Verfügung. Diese bieten zum einen Auslegungshilfe bei Profilblumen basierend auf der Berechnung der Bandkantendehnung, sie ermöglichen jedoch auch die Erstellung eines FE Modells für die Umformsimulation. Darüber hinaus sind in der Literatur Ansätze beschrieben, welche die Biegewinkelfolge analytisch bestimmen [BOG79], [HAL06]. Ziel bei der Entwicklung einer Profilblume ist immer, bei minimaler Anzahl von Umformstufen die maximal zulässige Bandkantendehnung nicht zu überschreiten. Diese ist nach [HAL06] im elastischen Bereich zu halten.

Um die Zielgeometrie Hutprofil abzubilden, können unterschiedliche Einformungen der Profilschenkel und Profilflansche verwendet werden. Prinzipiell ergeben sich drei verschiedene Ansätze (Abbildung 6-27).

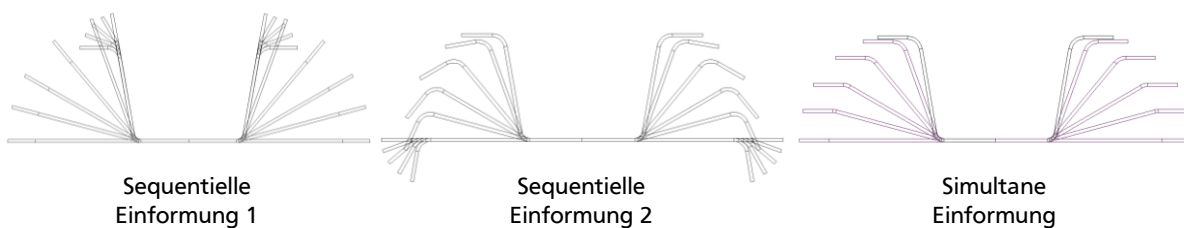


Abbildung 6-27: Prinzipielle Einformstrategien im Vergleich

Bei den sequentiellen Einformstrategien werden Flansch und Schenkel separat eingeformt, jeweils mit Biegewinkelfolgen von 20°, 40°, 60° und 80° für die Flansche und 15°, 30°, 50°, 70° und 80° für die Profilschenkel. Dagegen werden bei der simultanen Einformung beide Geometrieelemente gleichzeitig in Biegewinkelstufen 15°, 30°, 50°, 70° und 80° eingeformt. Bei der sequentiellen Profilblume (1) werden in einem ersten Schritt die Profilschenkel aufgestellt und in den folgenden Stufen die freien Flansche. Somit ergeben sich in mehreren Zwischenstufen sehr lange freie Schenkel, welche unter kritischen Material- und Werkstoffparametern in Verbindung mit falscher Winkelfolge zum Beulen neigen können [ZET07]. Dies kann aufgrund der zuvor eingeformten kurzen Flansche bei der sequentiellen Profilblume (2) vermieden werden. Hier erfolgt das Aufstellen der Profilschenkel erst nach der Einformung der Flansche. Diese können hinsichtlich einer beulkritischen Auslegung als

Einspannungen angenommen werden, wodurch die ertragbare Beulspannung im Druckbereich deutlich erhöht wird [KOL58]. Hinsichtlich der Eignung für das konventionelle Walzprofilieren empfiehlt sich die simultane Einformung. Zum einen reduziert sich die Anzahl der benötigten Umformstufen und zum anderen wird die Strecke der Bandkante im Raum bei dieser Profilblume gegenüber den sequentiellen Einformungen verringert.

Die Untersuchung der verschiedenen Einformstrategien werden unter Verwendung von Niederhaltern in der Simulation gemacht. Eingesetzt werden die Niederhalter in den Profilierstufen 50°, 70° und 80° in einem Abstand von 300 mm. Bei der Auswertung werden neben der Ebenheit des Profilbodens die resultierenden Längsdehnungen im oberen Bereich des Profilschenkels betrachtet.

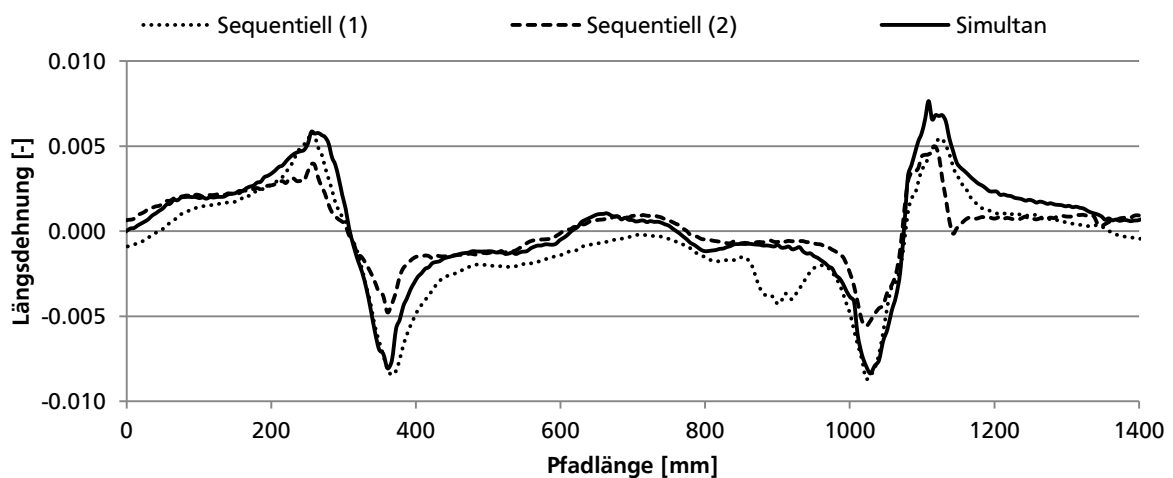


Abbildung 6-28: Vergleich der Längsdehnungen an der Zielgeometrie mit R500 und ZStE340 bei der Einformung mit den Strategien sequentiell (1), sequentiell (2) und simultan

Abbildung 6-28 zeigt die aus den Einformstrategien resultierenden Längsdehnungen bei der Verwendung unterschiedlicher Strategien aus Abbildung 6-27. Während die Längsdehnungen in den Übergangsbereichen bei der simultanen und der sequentiellen Einformung (1) in ähnlichen Größenordnungen liegen, fallen diese in den Übergangsbereichen unter Verwendung von sequentiell (2) ab. Sie liegen sowohl in den Zug- als auch in den Druckbereichen niedriger als bei den anderen Einformungen. Dies kann durch die Reihenfolge der Einformung von Schenkel und Flansch begründet werden. Bei der Einformung der Profilschenkel mit der Methode sequentiell (1) können sich die Längsdehnungen schon bei der Einformung des U-Profils einstellen. Bei der Methode sequentiell (2) muss der Hauptanteil der Längsdehnungen der Profilschenkel in den Übergangsbereichen nach der Einformung des U-Profils eingebracht werden. In dieser Zwischenform ist die Struktursteifigkeit durch den eingeformten Flansch deutlich erhöht. Dies bedingt einen höheren Widerstand gegen das Ausbilden der Längsdehnungen.

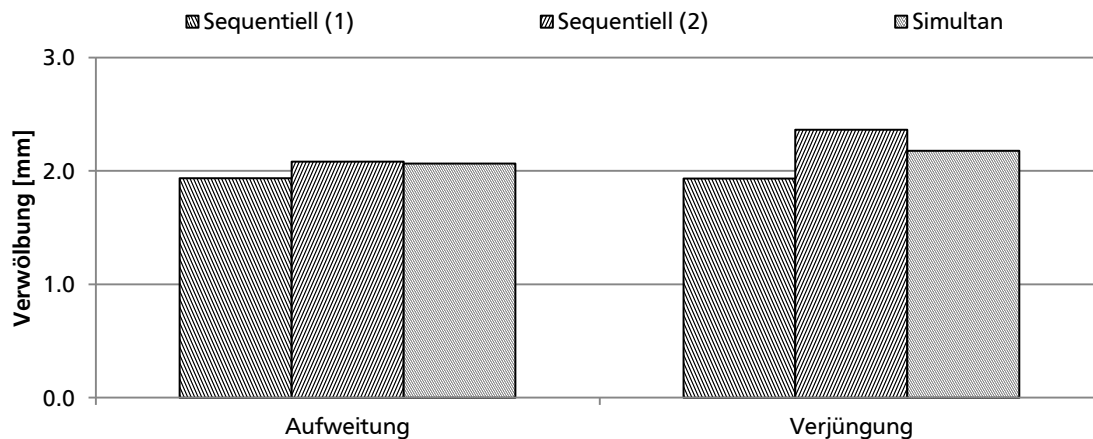


Abbildung 6-29: Vergleich der Bodenverwölbung an der Zielgeometrie mit R500 und ZStE340 bei der Einformung mit den Strategien sequentiell (1), sequentiell (2) und simultan

Die sich hinsichtlich der Verwölbung des Profilbodens einstellende Profilform korreliert nicht direkt mit den Verläufen der Längsdehnungen an den Profilschenkeln. Die Einformung mit der Einformstrategie sequentiell (1) ergibt die geringsten Abweichungen am Profilboden von der Zielgeometrie, wenngleich sich die Längsdehnungen nur geringfügig von denen mit der Einformung simultan unterscheiden. Als Begründung für dieses Verhalten muss die Biegewinkeltreue am Profil herangezogen werden. Messungen an den simulierten Bauteilen zeigen speziell bei der Einformung nach Strategie sequentiell (1) Unterschiede in den gefertigten Biegewinkeln am Profilschenkel. Trotz des Einsatzes konturfolgender Niederhalter zeigen sich bei dieser Einformung in den aufgeweiteten Bereichen Biegewinkel jenseits des Zielbiegewinkels von 80° . Dies äußert sich vor allem in den Bereichen der Aufweitung. Hier kommt es bei der sequentiellen Einformung (1) trotz des Einsatzes konturfolgender Niederhalter aus 6.1.1 zur Ausbildung ungewollter Biegekanten im Aufweitungsbereich. Hieraus folgt eine stärkere Übertragung der Geometrieabweichung im Profilboden auf die Profilflansche, wodurch sich dort eine stärkere Abweichung von der Zielgeometrie einstellt (vgl. Abbildung 6-30). Demgegenüber lassen sich bei simultaner Einformung die Verwölbungen des Profilbodens direkt auf die an den Flanschen übertragen. Es können um bis zu 1 mm erhöhte Abweichungen am Flansch auftreten, wenn nach der Methode sequentiell (1) eingeformt wird.

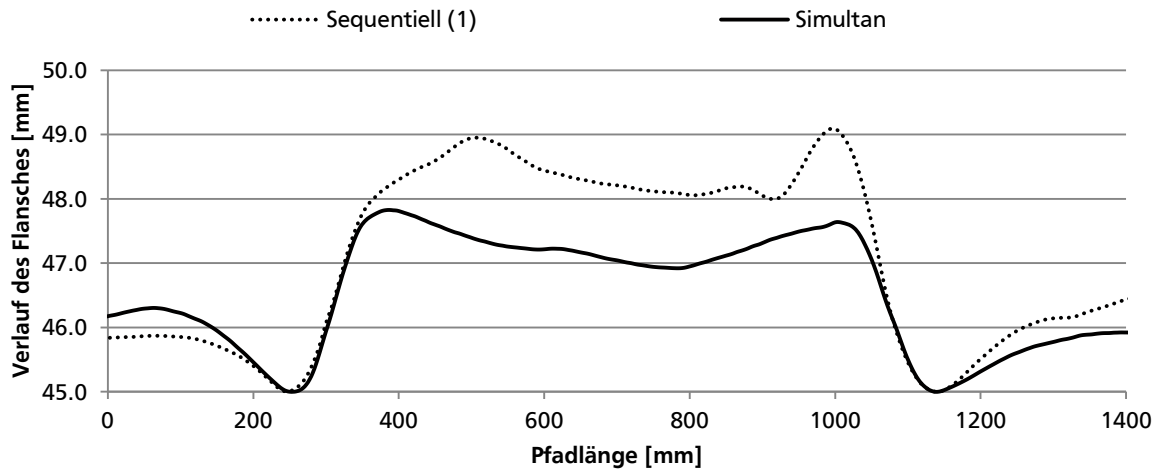


Abbildung 6-30: Vergleich des Flanschgeometrie bei der Einformung mit den Strategien sequentiell (1) und simultan

Neben dieser strengen Unterscheidung bietet sich noch eine Mischform aus sequentieller und simultaner Einformung an. Um eine Steigerung der Längsdehnungen in den Übergangsbereichen zu erzielen, kann in den ersten Stufen der Profilschenkel eingeformt werden. Da der lange, freie Profilschenkel jedoch anfällig hinsichtlich Beulen ist, muss der Flansch vor Erreichen der beulkritischen Spannung im Profilschenkel eingeformt werden.

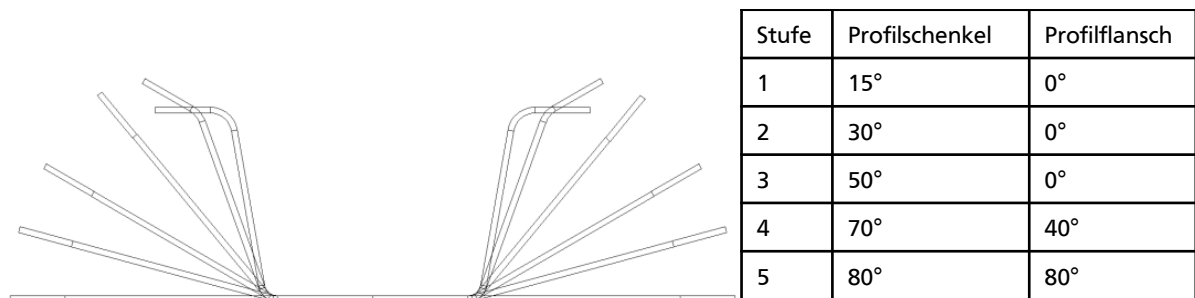


Abbildung 6-31: Kombinierte Einformstrategie

Die relativ kurzen Profilflansche lassen sich in weniger Einformstufen einformen, ohne dabei beulkritische, plastische Längsdehnungen in den geraden Profilbereichen einzubringen. Hierdurch erscheint es als möglich, zuerst die Profilschenkel einzuförmn und dabei die Längsdehnungen in den Übergangsbereichen gegenüber der simultanen Einformung noch zu steigern. Verglichen mit den Längsdehnungen, welche sich mit simultaner Einformung erzielen lassen, zeigen sich bei der vorgeschlagenen kombinierten Einformung nur geringe Unterschiede. Die schwachen Verbesserungen durch die kombinierten Strategien zeigen jedoch, dass die letzten Umformstufen ausschlaggebend für die Längsformänderung und die resultierende Profilform sind (vgl. Abbildung 6-32). Hieraus folgt auch, dass die Geometrie am Profilboden mit beiden Strategien nahezu identisch ist (vgl. Abbildung 6-33).

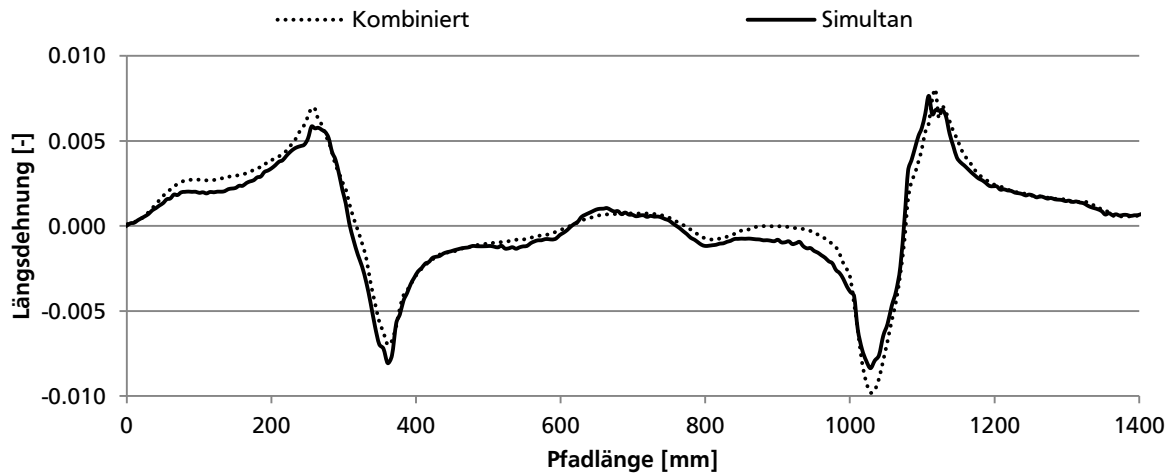


Abbildung 6-32: Vergleich der Längsdehnungen an der Zielgeometrie mit R500 und ZStE340 bei der Einformung mit den Strategien Mischform und simultan

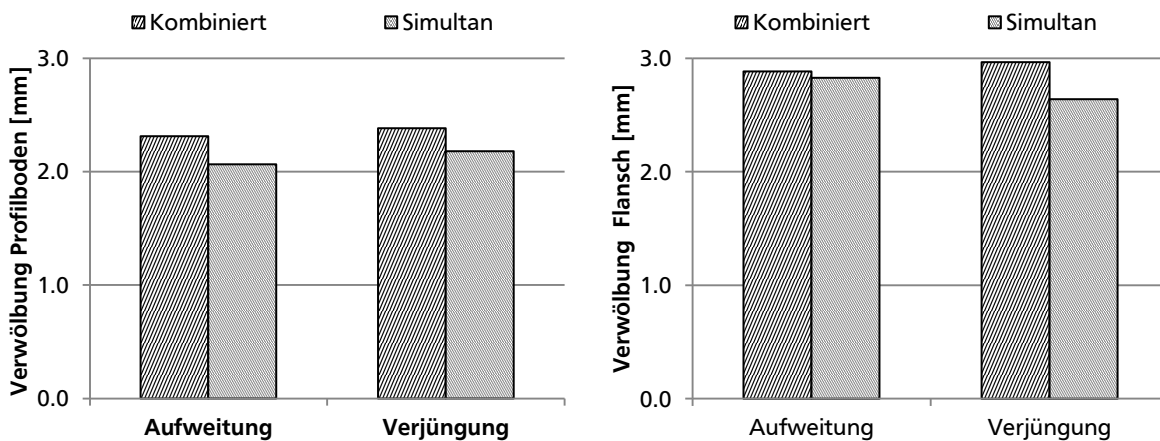


Abbildung 6-33: Vergleich der Bodenverwölbung an der Zielgeometrie mit R500 und ZStE340 bei der Einformung mit den Strategien Mischform und simultan

Beim Vergleich der Eingformstrategien kann darauf geschlossen werden, dass die Einformung eines Hutprofils mit simultaner oder kombinierter Einformstrategie die meisten Vorteile hinsichtlich Geometriegüte und Anlageninvest bietet. Dies zeigt sich durch die Kombination der besten Geometrietreue in Verbindung mit der niedrigsten Anzahl von notwendigen Umformstufen. Während die Einformung mit sequentiellen Strategien mit jeweils neun Stufen realisiert wurde, wurden für die gemischte und simultane Einformung jeweils nur fünf Stufen benötigt.

6.2.2 Einfluss der Geometrie im Übergangsbereich

Wie schon in [LAR10] gezeigt, hat die Gestaltung des Übergangsbereiches bei flexibel profilierten Bauteilen einen Einfluss auf die Bauteilqualität. Durch die Vergrößerung der Übergangsradien erfolgt die Aufweitung über eine größere Strecke, wodurch die Querschnittsänderung sanfter erfolgt. Im Rahmen der folgenden Untersuchungen wird der Konturradius gegenüber dem der Zielgeometrie von 500 mm auf 900 mm bzw. 1300 mm vergrößert. Die Aufweitung des Profils wird konstant gehalten, wodurch sich die Breitenänderung am Profil über eine längere Strecke ergibt. Abbildung 6-34 zeigt für die unterschiedlichen Konturradien der Hutprofile die erreichten Verläufe der Längsdehnungen. Es wird deutlich, dass die Maximalwerte mit steigendem Konturradius abnehmen, wie es sich auch aus Formel 5-1 schließen lässt.

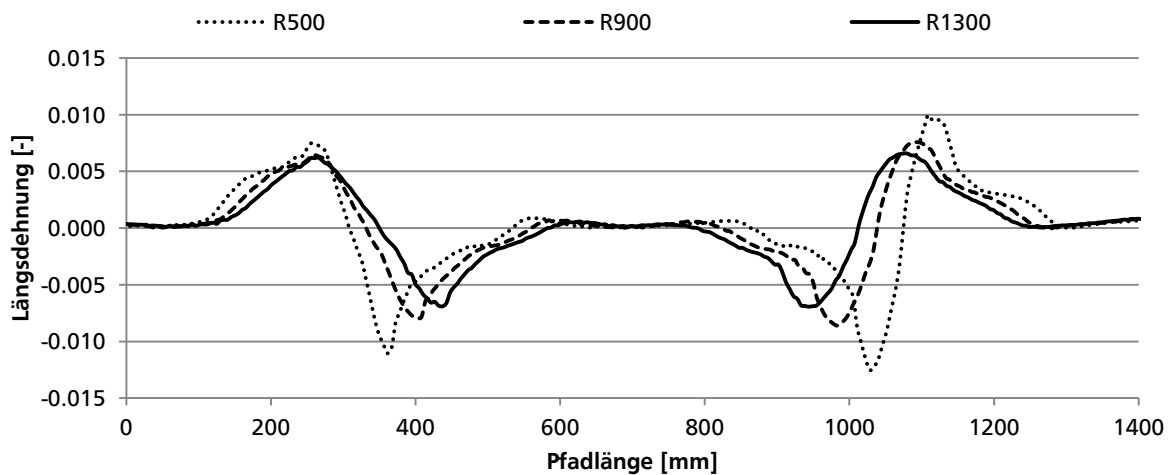


Abbildung 6-34: Vergleich der Längsdehnungen im Profilschenkel an der Zielgeometrie mit ZStE 340, $t = 1,35$ mm und den Konturradien R500, R900 und R1300

Der Effekt auf die Verwölbung der Profilbauteile ist in Abbildung 6-35 dargestellt. Es zeigt sich jedoch im Vergleich zum Einfluss, welcher aus Blechdicken- und Materialvariation entsteht, ein deutlich geringerer Unterschied. Hierbei wird bei Vergrößerung des Übergangsradius von 500 mm auf 1300 mm nur eine Reduktion um ca. 15% in der Aufweitung und um 12% im Bereich der Verjüngung erreicht. Dies entspricht jedoch auch den Trends, welche sich aus der Variation dieses Parameters ohne den Einsatz von Niederhaltern erwiesen haben (vgl. 5.3.2).

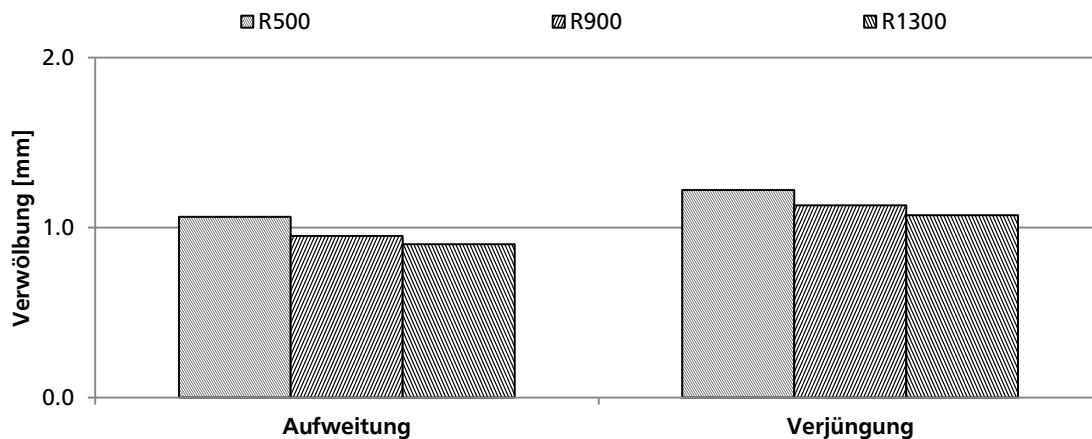


Abbildung 6-35: Vergleich der Bodenverwölbung an der Zielgeometrie mit ZStE340, $t = 1,35$ mm und den Konturradien R500, R900 und R1300

6.2.3 Einfluss der Blechdicke

Durch den Trend hin zur Gewichtsreduktion in Strukturbauteilen kommt im Strukturleichtbau unter anderem auch die Verwendung reduzierter Blechdicken zum Einsatz. In Verbindung mit hoch- und höchstfesten Werkstoffgütern kann mit reduzierter Blechdicke ein Bauteil mit vergleichbaren Festigkeitseigenschaften, aber geringerem Gewicht realisiert werden. Basierend auf der Blechdicke der Zielgeometrie von 1,35 mm werden im Rahmen der Untersuchungen exemplarisch Bauteile mit den Blechdicken 1 mm und 1,7 mm betrachtet. Somit soll der Einfluss der Blechdicke auf die Profilqualität in Hinsicht auf die Bodenverwölbung und den resultierenden Anforderungen an die Anlagenauslegung betrachtet werden.

Abbildung 6-36 zeigt den Einfluss der Blechdicke auf die lokale Verwölbung des Profilbodens. Die Bauteile sind mit den gleichen Anlageneinstellungen für Niederhalter, Biegewinkelschritte und Gerüstabstand zwischen Einform- und Antriebsgerüst simuliert worden. Verfahrbare Niederhalter kamen in den Stufen 50°, 70° und 80° zum Einsatz. Deutlich erkennbar ist die Tendenz, dass mit steigender Blechdicke die Verwölbung des Profilbodens abnimmt. Gleichzeitig zeigt sich auch ein Anstieg der Längsdehnungen an den Profilschenkeln. Als Erklärung kann die weniger steife Struktur bei geringerer Blechdicke herangezogen werden. Ein Profil mit geringerer Blechdicke wird, vergleichbar mit dem Verhalten beim Stabilitätsversagen einer Struktur, stärker zum Beulen neigen als ein Bauteil mit großer Wandstärke. Dieses bietet einen höheren Widerstand während der Einformung und trägt somit dazu bei, ein erhöhtes Maß an Längsdehnungen in die Flansche zu induzieren (Abbildung 6-37).

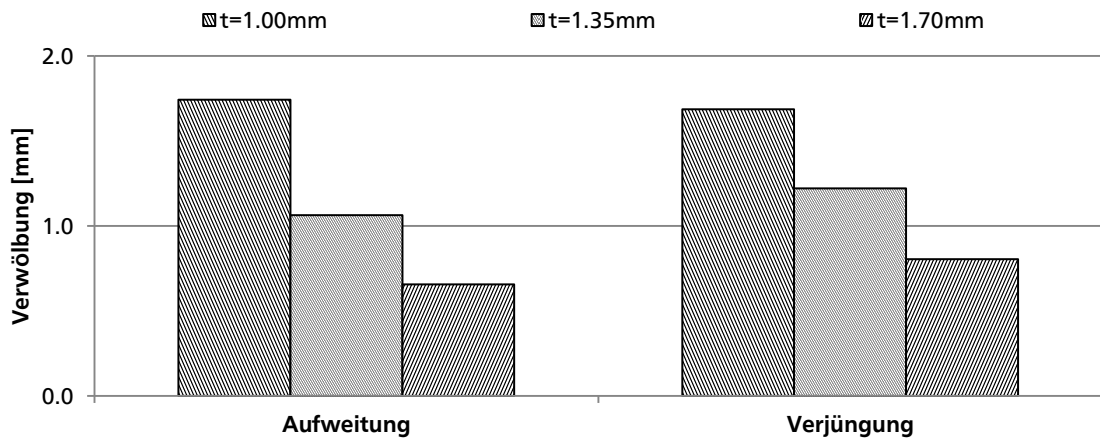


Abbildung 6-36: Vergleich der Bodenverwölbung an der Zielgeometrie mit R500 und ZStE340 mit Blechdicken t 1 mm, 1,35 mm und 1,7 mm

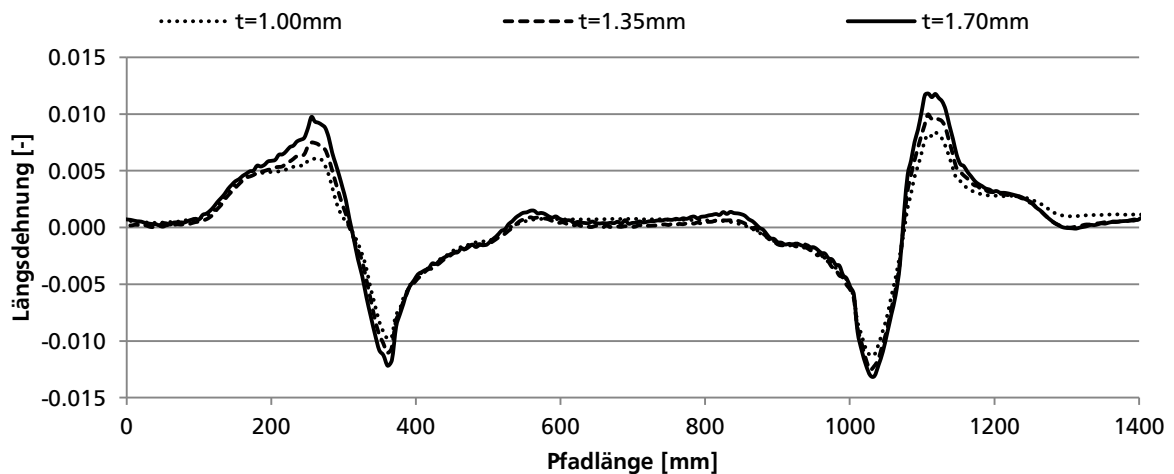


Abbildung 6-37: Vergleich der Längsdehnungen an der Zielgeometrie mit R500 und ZStE340 mit Blechdicken t 1 mm, 1,35 mm und 1,7 mm

Beim Vergleich des Einflusses der Blechdicke auf die Bodenverwölbung mit und ohne Niederhalter fällt auf, dass die Varianz der Werte mit Niederhalter größer ausfällt als ohne Niederhalter. Treten unter 5.3.2 noch Unterschiede in der Bodenverwölbung von ca. $\pm 10\%$ bei Verringerung bzw. Erhöhung der Blechdicke um 0,35 mm auf, ergeben sich deutlich größere Änderungen von ca. $\pm 40\%$ in der Bodenverwölbung beim Einsatz von Niederhaltern. Die von außen eingeleiteten Niederhalterkräfte lassen sich somit bei größeren Blechdicken deutlich besser in die Reduktion der Bodenverwölbung umsetzen, als dies bei geringerer Blechdicke möglich ist. Für das Verarbeiten geringerer Blechdicken erscheinen somit Eingriffe zur weiteren Steigerung der Längsdehnungen für notwendig, um weitere Reduktionen in der Bodenverwölbung zu erzielen.

6.2.4 Einfluss des Materials

Der Trend zur Reduktion der Blechdicke und der sich daraus ergebende Leichtbauvorteil bedürfen des Einsatzes hoch- bzw. höchstfester Stahlgüten. Beim Tiefziehen solcher Stahlgüten kommt es in der Regel zu starken Rückfederungseffekten [HUE01]. Bei der Verarbeitung hoch- und höchstfester Stahlgüten mittels Walzprofilieren lassen sich bei geeigneter Anlagenauslegung enge Toleranzen hinsichtlich Rückfederung realisieren [GRO08]. Untersuchungen zum Einsatz unterschiedlicher Materialgüten sind in [LAR10] aufgeführt, wobei aufgrund unterschiedlicher Blechdicken der eingesetzten Materialien keine eindeutigen Aussagen über den Einfluss der Materialgüte gemacht werden können. Im Rahmen der Arbeit werden an der Zielgeometrie die Stahlwerkstoffe ZStE340, TRIP700 und PM800 mittels Simulation untersucht. Die flexiblen Profilierrollen wie auch die Anzahl der Niederhalter in den Stufen 50°, 70° und 80° bleiben für jeden Werkstoff konstant.

Deutlich erkennbar ist die stärkere Bodenverwölbung bei der Verwendung von höchstfesten Materialgüten (Abbildung 6-38). Hier ergibt sich im Bereich der Aufweitung bei PM800 eine lokale Verwölbung von 2,3 mm und im Verjüngungsbereich eine Verwölbung von 2,4 mm. Demgegenüber liegen die Werte bei ZStE340 bei 0,9 mm bzw. 1,4 mm. Weiterhin zeigt sich, dass eine geringere Längskrümmung der gerade profilierten Bereiche auftritt, wenngleich die absoluten Werte wie in 4.1.4 beschrieben nicht mit denen aus dem Realversuch übereinstimmen. Da das Material höherer Festigkeit jedoch einen höheren Widerstand gegen Auswalzen hat, kommt es hier zu einer geringeren Längung des Profilbodens.

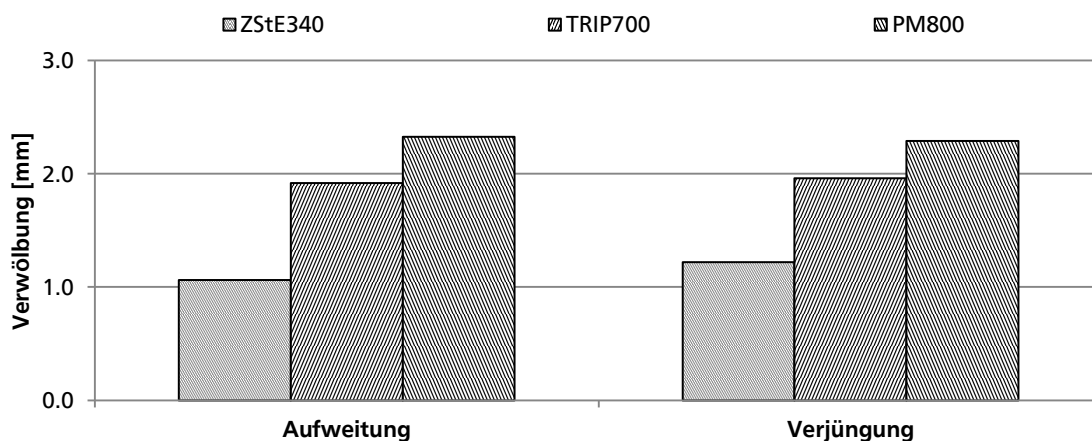


Abbildung 6-38: Vergleich der Bodenverwölbung an der Zielgeometrie mit R500 und t = 1,35 mm in den Materialgüten ZStE340, TRIP700 und PM800

Der Anstieg in der Bodenverwölbung zeigt sich auch beim Betrachten der Längsdehnungen in den Übergangsbereichen. Die Materialgüten TRIP700 und PM800 erfahren deutlich geringere Längsdehnungen (Abbildung 6-39). Somit ist die Abstützung mittels der vorgeschlagenen

Niederhalter allein, besonders bei hochfesten Materialgütern, nicht ausreichend, um die gewünschte Geometrie zu erhalten.

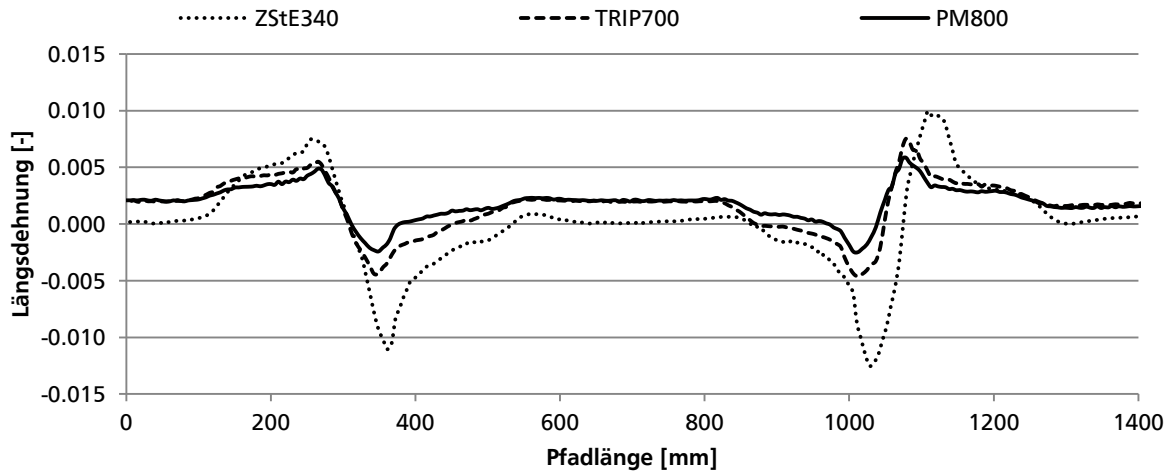


Abbildung 6-39: Vergleich der Längsdehnungen im Profilschenkel an der Zielgeometrie mit R500 und $t = 1,35$ mm in den Materialgütern ZStE340, TRIP700 und PM800

Im Vergleich zu dem Anstieg der Bodenverwölbung ohne Niederhalter mit gegenüber der Referenz steigender Festigkeit zeigt sich bei Verwendung von Niederhaltern, dass der prozentuale Unterschied in der Bodenverwölbung größer ausfällt. Beispielsweise ergibt sich im Aufweitungsbereich durch den Einsatz von Niederhaltern bei dem Referenzmaterial ZStE340 eine Reduktion der Bodenverwölbung auf nahezu 28% des Wertes ohne Niederhalter, wohingegen bei TRIP700 der Wert nur auf 41% und bei PM800 auf 48% reduziert werden konnte.

6.3 Aktive Komponenten in flexiblen Walzprofilieranlagen

Die bisher gezeigten Maßnahmen zur Reduktion der Profilverwölbung im Übergangsbereich lassen sich als passive Prozesseingriffe beschreiben, welche über den gesamten Profilierprozess zu jedem Zeitpunkt wirken. Auch wenn gerade Bereiche profiliert werden, sind diese Methoden aktiv. Über die Profillänge unterscheiden sich jedoch die Eigenschaften des Bauteils stark, woraus unterschiedliche Anforderungen an das Werkzeugsystem resultieren. Da die Verwölbung des Profilbodens nur lokal auftritt, sollte auch hier gezielt eingegriffen werden, um die Verwölbung zu beeinflussen.

6.3.1 Aktive mechanische Systeme zur Steuerung der Längsdehnungen

Untersuchungen aus den vorherigen Kapiteln haben gezeigt, dass die Längsdehnung im Profilschenkel einen direkten Einfluss auf die Verwölbung des Profilbodens hat. Es konnte allerdings auch gezeigt werden, dass trotz des Einsatzes von Niederhaltern aufgrund der im Prozess vorherrschenden endlichen Steifigkeiten deren Einsatz nur zu einer Milderung der Bodenverwölbung führt. Durch das Einbringen zusätzlicher aktiver Komponenten in den Profilierprozess soll das Profil gezielt kalibriert werden. Hierbei kann auf die unterschiedlichen Bauteileigenschaften und die resultierenden Anforderungen an Werkzeugsysteme reagiert werden.

Zur Beeinflussung der Längsdehnungen im Übergangsbereich bieten sich unterschiedliche Methoden an. Diese lassen sich aus dem konventionellen Walzprofilieren ableiten oder müssen speziell für das flexible Walzprofilieren entwickelt werden. Neben der Bauteilgeometrie hat nach [BHA84] der Biegewinkelschritt und nach [HAL06] die Ausrichtung der Transportebene im Sinne von Berg- bzw. Talfahrt einen Einfluss auf die Längsdehnungen.

[ONA10] zeigt zur Geometrieverbesserung die Möglichkeit des lokalen Auswalzens auf. Die Strecke AB in Abbildung 2-9 wird während des Profilierens zusätzlich gelängt und kann somit die geforderte Länge der Strecke A'B' erreichen. Im Druckbereich erfährt durch das Auswalzen des Profilbodens die Strecke B'C' eine Längung und kommt somit der Länge der Strecke BC entgegen.

Ein Werkzeugsystem mit höhenveränderlichen Rollenpositionen kann als gesteuerte Berg- bzw. Talfahrt genutzt werden. Den unterschiedlichen Richtungen der konkaven und konvexen Anteile der Bodenverwölbung kann somit entgegengesteuert werden. Hierdurch könnte im konkaven Bereich durch ein Anheben der flexiblen Profilierrollen die Strecke AB zusätzlich gelängt und beim Absenken der Profilierrollen die Strecke BC gestaucht werden.

Als weitere Möglichkeit, Längsdehnungen zu erhöhen, ist die Vergrößerung des Biegewinkelschrittes. Wie in 5.3 gezeigt, steigen die Längsdehnungen von Stufe zu Stufe an.

Somit können die Längsdehnungen durch ein Erhöhen des Biegewinkels über den Zielbiegewinkel hinaus vergrößert werden. Mit einem anschließenden Kalibrieren des Biegewinkels auf den Zielbiegewinkel kann dadurch die Zielgeometrie beeinflusst werden [BER11].

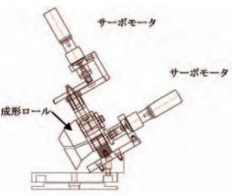
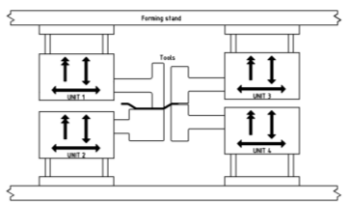
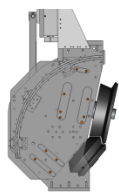
Prinzipielle Darstellung	Eigenschaften	Umgesetzt in
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lokales Auswalzen des Profilbodens bzw. Flansches ▪ Sehr hohe Kräfte und Steifigkeiten bei hochfesten Stählgüten notwendig ▪ 1 Antrieb pro Gerüsthälfte 	[ONA10]
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Höhenveränderliche Rollenposition ▪ Vergleichbare Kräfte wie beim Walzprofilieren ▪ 2 Antriebe pro Gerüsthälfte 	[FAG09] [LIN09a] [P05]
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lokales Überbiegen ▪ Vergleichbare Kräfte wie beim Walzprofilieren ▪ 1 Antrieb pro Gerüsthälfte 	[BER11]

Tabelle 6-3: Konzepte zur Erhöhung der Längsdehnungen im Übergangsbereich beim flexiblen Walzprofilieren

Tabelle 6-3 zeigt eine Gegenüberstellung vorgeschlagener und teilweise umgesetzter Konzepte zur Erhöhung der Längsdehnungen mittels mechanischem Prozesseingriff beim flexiblen Walzprofilieren. Wie in [LAR11] beschrieben kann dieses Ziel auch mittels lokalem Wärmeeintrag realisiert werden. [ONA10] konnte den positiven Einfluss des lokalen Auswalzens von Profilboden und Profilschenkel nachweisen. Die Umsetzung des Prinzips erlaubt die Steuerung des Systems mit einem Motor pro flexibler Walzprofiliergerüsthälfte [ONA08]. Versuche zeigten, dass die Steifigkeit des Werkzeugaufbaus eine entscheidende Rolle spielt. Nach [FRI08b] ergibt sich die zum Auswalzen benötigte Kraft F_W zu:

$$F_W = A_d \frac{k_f}{\eta_F} \quad \text{Formel 6-6}$$

Somit ist diese umgekehrt proportional zum Umformwirkungsgrad η_F und proportional zur gedrückten Fläche A_d und der Fließspannung k_f . Dies bedingt insbesondere bei hochfesten Stählgüten die Notwendigkeit der Bereitstellung hoher Kräfte durch die Aktorik. Durch einen möglichst steifen Aufbau sind diese zur Umformzone zu leiten.

Vergleichbar mit der Kinematik für breitenveränderliches flexibles Walzprofilieren bedarf es bei der Verwendung höhenveränderlicher Rollenpositionen einer Werkzeugkinematik mit

translatorischer und rotatorischer Verstellbarkeit (vgl. 6.1). Bei einem seriellen Aufbau auf einer breitenveränderlichen Werkzeugkinematik werden somit pro Gerüsthälfte weitere zwei Antriebe benötigt. Hierdurch steigt die Gesamtzahl der angetriebenen Achsen und der Invest und die Komplexität einer solchen Anlage erhöhen sich weiter.

Durch die Integration einer Überbiegeachse in eine flexible Walzprofilieranlage bedarf es bei serieller Integration auf der, am PtU vorhandenen flexiblen Walzprofilieranlage nur der Erweiterung der Kinematiken um eine gesteuerte Achse pro Gerüsthälfte. Die durch den Prozess wirkenden Kräfte können als vergleichbar mit denen aus dem flexiblen Walzprofilieren angenommen werden. Hieraus folgt, dass das Überbiegen auch für den Einsatz bei hoch- und höchstfesten Stahlgüten geeignet erscheint.

6.3.2 Überbiegeaktuatorik

Aufgrund der lokalen Änderung des Biegewinkels erscheint es zwar als möglich, die Längsdehnungen in den Übergangsbereichen zu erhöhen, dies geht allerdings mit einem über die Profillänge veränderlichen Biegewinkel einher. In einer Anlagenkonfiguration mit integriertem lokalem Überbiegen wird eine solche Umformstufe folglich in einer der vorletzten Umformstufen eingesetzt. Um nach dem Prozesseingriff das Bauteil wieder auf den Zielbiegewinkel einzustellen, wird in einer letzten Umformstufe das Bauteil abschließend kalibriert (vgl. Abbildung 6-40). Mittels geeigneter Auslegung kann somit die Anzahl der Umformstufen konstant gehalten werden.

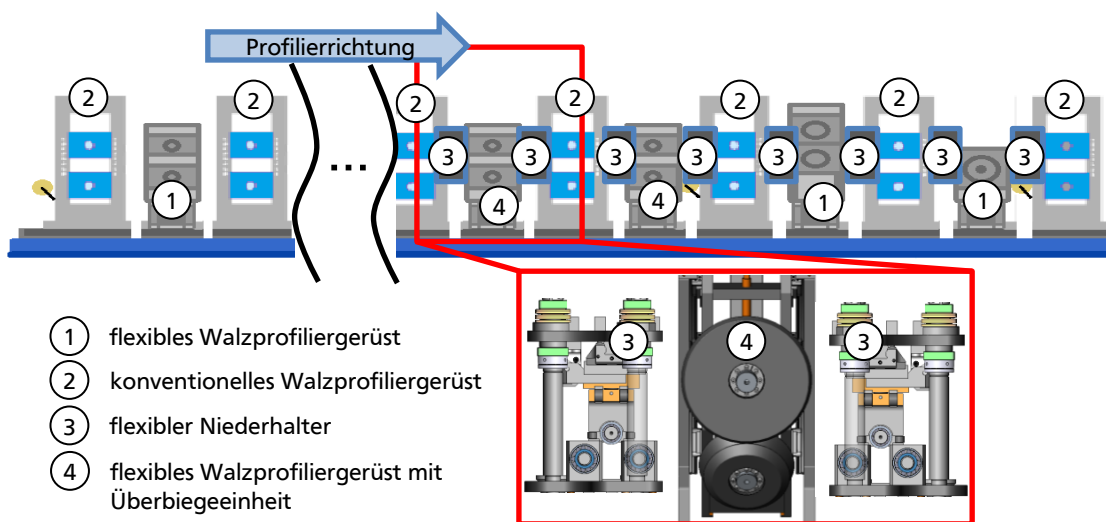


Abbildung 6-40: Anlagenlayout mit lokalem Überbiegen der Profilschenkel in der 80° Stufe und anschließender Kalibrierstufe mit 80° Zielbiegewinkel

Da es sich bei dem vorgeschlagenen Prozesseingriff um eine gesteuerte Rotation der Umformwerkzeuge um den Biegeradius (1) nach [P10] handelt (vgl. Abbildung 4-1), können verschiedene Überbiegestrategien verfolgt werden. Abbildung 6-41 zeigt die unterschiedlichen

untersuchten Strategien zum lokalen Überbiegen, wobei der eingestellte Biegewinkel der Position am Profil gegenübergestellt ist. In der 80° Stufe wird nach Strategie (1) über den gesamten Übergangsbereich mit dem Biegewinkel $80^\circ + \beta$ profiliert und in den geraden Bereichen wieder auf 80° eingestellt. Die Strategien (2) und (3) überbiegen jeweils am Ein- bzw. Ausgang des Übergangsbereiches. Die Überbiegewinkel liegen bei 5° , 10° und 15° . Da eine Steigerung der Längsdehnung erreicht werden soll, kommt das Überbiegen in Verbindung mit flexibel verfahrbaren Niederhaltern aus 6.1 zum Einsatz. Der Niederhalterabstand zu den flexiblen Profiliergerüsten beträgt 200 mm. Mit dieser Einstellung konnten mit Niederhaltern als passive Prozessunterstützung die größten Längsdehnungen in die Profilschenkel eingebracht und somit die besten Werte hinsichtlich der Profilbodenverwölbung erreicht werden.

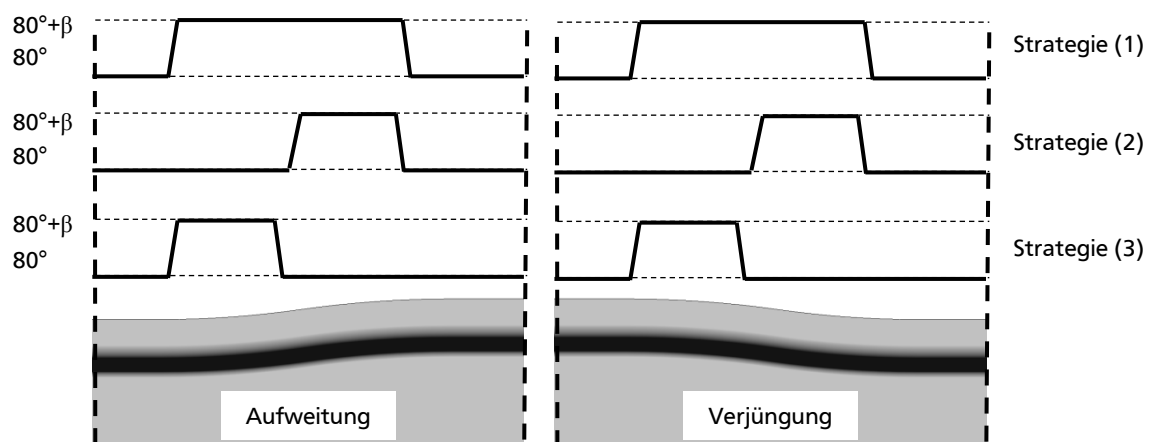


Abbildung 6-41: Strategien zum lokalen Überbiegen der Profilschenkel in der 80° Stufe (nach [BER11])

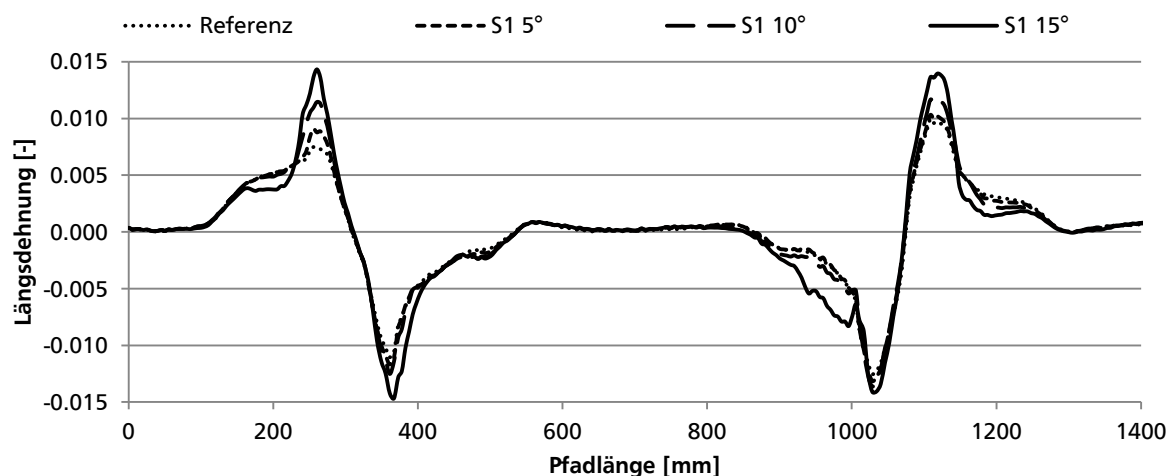


Abbildung 6-42: Längsdehnungen beim Überbiegen mit der Strategie (1) mit 5° , 10° und 15° im Vergleich mit der Referenz ohne Überbiegen

Nach Strategie (1) zeigt sich ein deutlicher Anstieg der Längsdehnungen (vgl. Abbildung 6-42). Speziell die Zugbereiche erfahren eine Steigerung des Maximalwertes in der

Längsdehnung von bis zu 44% bei einem Überbiegewinkel von 15°. Die Druckbereiche hingegen erfahren lediglich eine Steigerung von ca. 17% bei gleichem Überbiegewinkel. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass diese schon beim Referenzmodell deutlich höher liegen als die Zugbereiche. Die Strategien (2) und (3) haben jeweils nur geringeren Einfluss auf die Längsdehnungen in den Übergangsbereichen (vgl. Abbildung 6-43 und Abbildung 6-44). Es zeigt sich allerdings, dass durch Überbiegen der Zugbereiche die Längsdehnungen dort direkt ansteigen, wohingegen das ausschließliche Überbiegen der Druckbereiche dort nur geringen Einfluss hat.

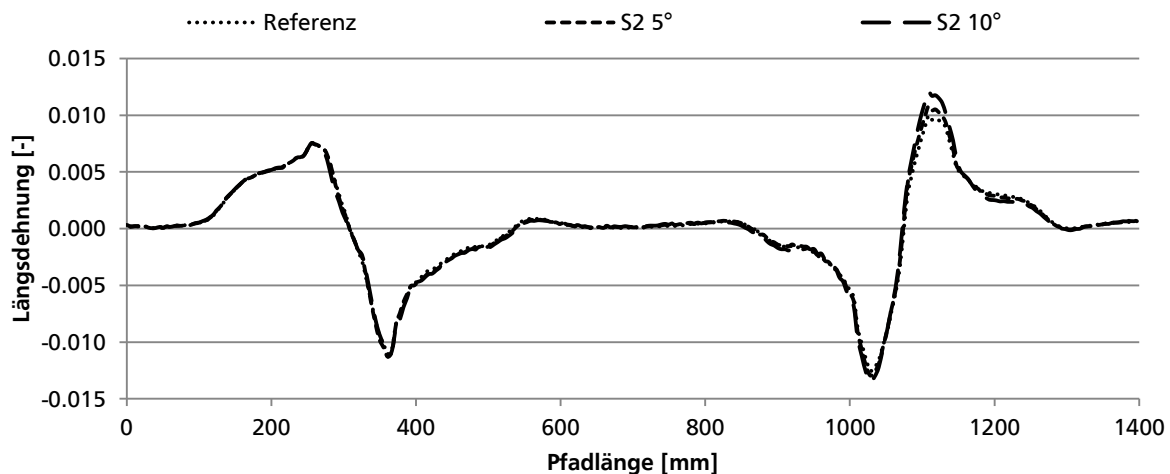


Abbildung 6-43: Längsdehnungen beim Überbiegen mit der Strategie 2 mit 5° und 10° im Vergleich mit der Referenz ohne Überbiegen

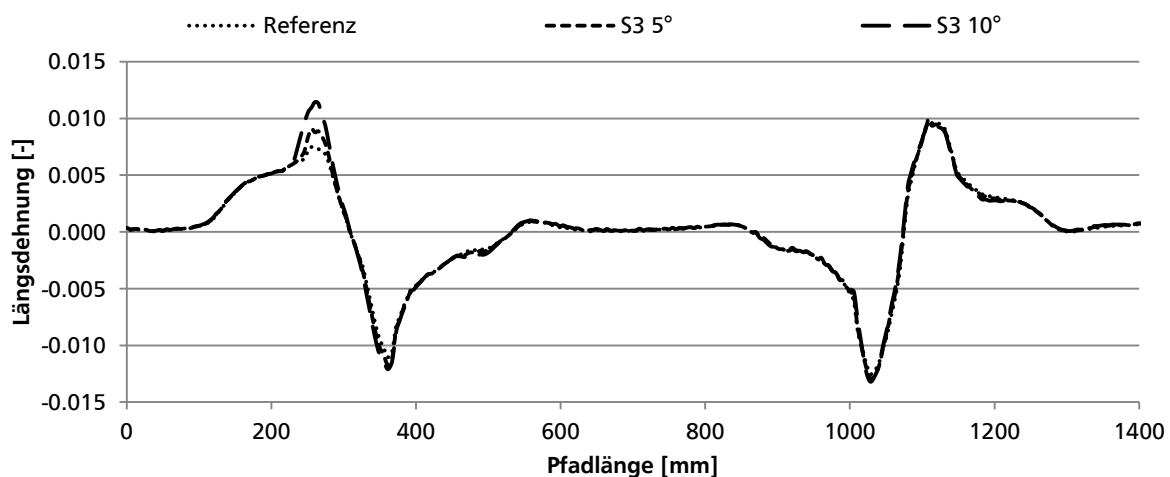


Abbildung 6-44: Längsdehnungen beim Überbiegen mit der Strategie 3 mit 5° und 10° im Vergleich mit der Referenz ohne Überbiegen

Lokal kann das Ansteigen der Längsdehnungen in den Übergangsbereichen allerdings zum Ausbeulen der Flansche führen. Dies zeigt sich beispielsweise beim Überbiegen nach Strategie

(1) am Anfang des Druckbereiches der Verjüngung. Dieses Phänomen tritt vor allem dann auf, wenn der Überbiegewinkel zum Eingang des Druckbereichs eingestellt wird. Durch die Anpassung des Überbiegewinkels erst im Zugbereich der Verjüngung kann dies vermieden werden (vgl. Abbildung 6-45)

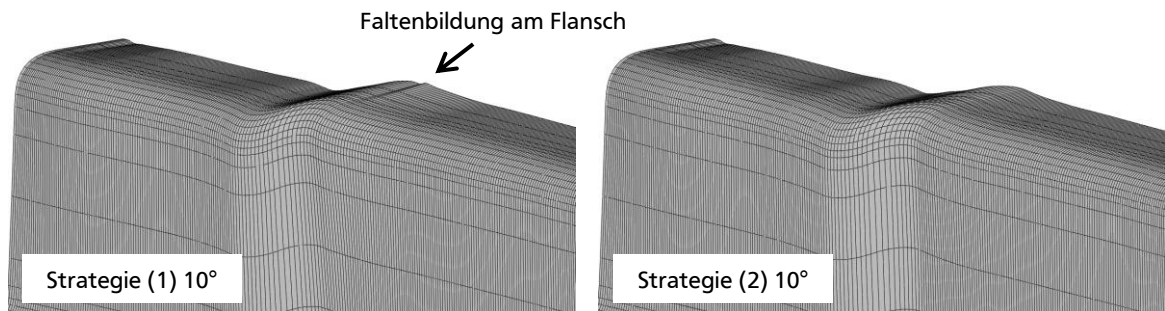


Abbildung 6-45: Faltenbildung nach dem Überbiegen mit der Strategie 1 mit 10° im Druckbereich der Verjüngung des Bauteils im Vergleich zur Überbiegestrategie (2)

Neben der Vermeidung von Falten am Eingang der Druckbereiche zeigt sich, dass das Überbiegen in den Zugbereichen zu bevorzugen ist. Wie an den Referenzverläufen der Längsdehnungen ohne Überbiegen zu sehen, liegen die Längsdehnungen im Druckbereich deutlich über denen im Zugbereich. Grund hierfür ist eine bessere Abstützung gegen Absenken des Profils mittels der eingesetzten Niederhalter. Um die Längsdehnungen in den Zugbereichen gezielt zu steigern, wird somit als Überbiegestrategie ein lokales Überbiegen dieser vorgeschlagen (Abbildung 6-46).

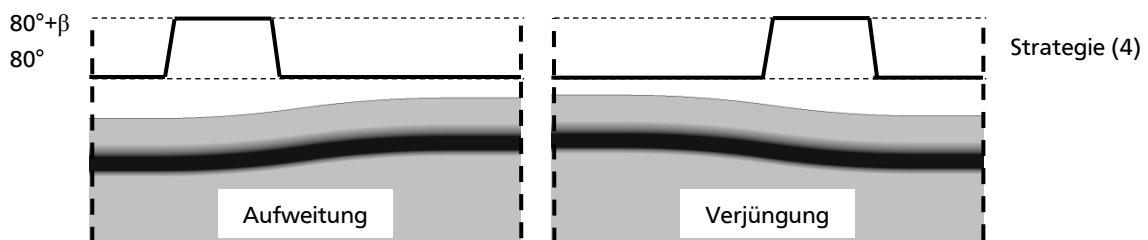


Abbildung 6-46: Strategien zum lokalen Überbiegen der Profilschenkel in den Zugbereichen der Querschnittsänderung

Die Strategie zum lokalen Überbiegen der Zugbereiche zeigt einen dortigen lokalen Anstieg der Längsdehnungen. Die Dehnungen in den Druckbereichen steigen nur geringfügig an, so dass die Maximalwerte der Längsdehnungen in Zug- und Druckbereich nahezu gleiches Niveau erreichen (vgl. Abbildung 6-47)

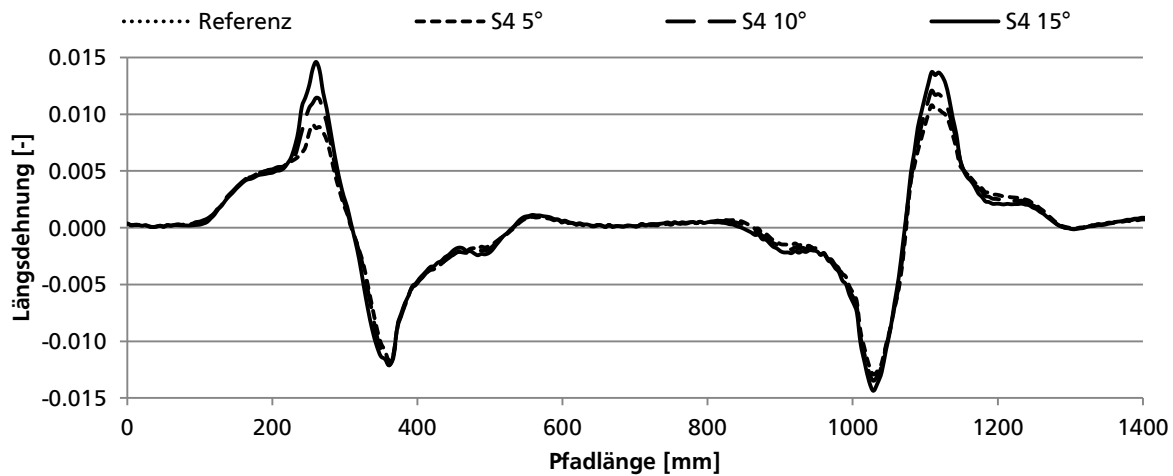


Abbildung 6-47: Längsdehnungen beim Überbiegen mit der Strategie 4 mit 5°, 10° und 15° im Vergleich mit der Referenz ohne Überbiegen

Allerdings ist festzustellen, dass sich der Zugewinn an Längsdehnungen am fertigen Bauteil nicht direkt in eine verringerte Bodenverwölbung umsetzen lässt (vgl. Abbildung 6-48). Vielmehr zeigt sich, dass nach dem Kalibrieren in der zusätzlichen 80° Stufe eine Längskrümmung des Profils nach unten eingebracht wird. Dieser nimmt mit steigendem Überbiegewinkel zu. Hierdurch ergibt sich mit der Überbiegestrategie (4) zunächst eine schlechtere Geometrietreue der Profile über der gesamten Profillänge. Mittels Kalibrierstation kann ein solcher Bauteilfehler allerdings gerichtet werden. Um der Längskrümmung entgegenzuwirken, werden die flexiblen Profiliergerüste aus der Profilierebene in der Simulation nach unten versetzt. Hierdurch kann vergleichbar mit einem Kalibriergerüst in konventionellen Walzprofilieranlagen ein konstantes Biegemoment eingebracht und so die Profilkrümmung reduziert werden.

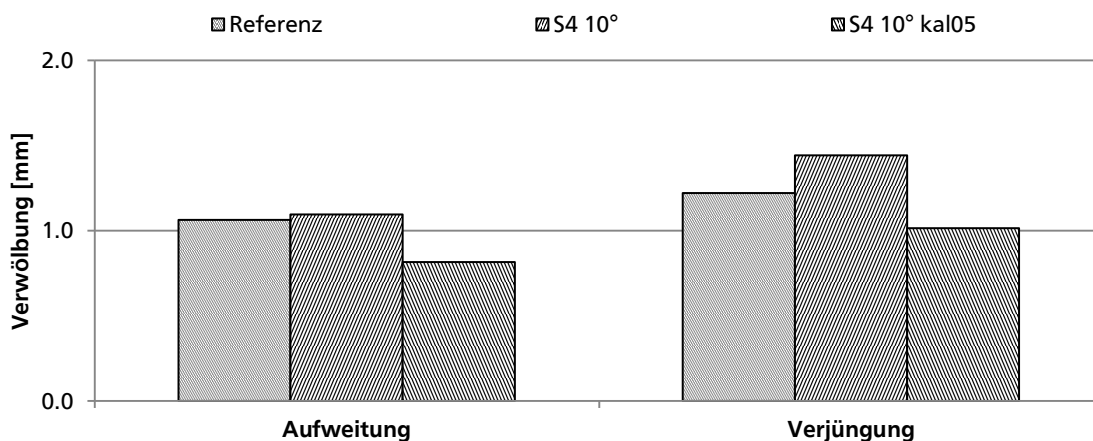


Abbildung 6-48: Bodenverwölbung beim Überbiegen mit der Strategie 4 mit 10° und Kalibrieren der Längskrümmung im Vergleich mit der Referenz ohne Überbiegen

Gegenüber der Referenz ohne Überbiegen, kann die Verwölbung gegenüber 1,05 mm in der Aufweitung auf 0,8 mm reduziert werden und somit eine prozentuale Verbesserung von 23% erzielt werden. Auch die Verjüngung erfährt eine Reduktion von 1,22 mm auf knapp über 1 mm und somit eine Verbesserung um ca. 18%. Insofern lässt sich durch den Einsatz der Niederhalter und der Überbiegestrategie eine Ebenheit des Profils von ca. 1 mm über die gesamte Bauteillänge von 1400 mm realisieren. Demgegenüber steht eine Ebenheit über die gesamte Profillänge von ca. 1,22 mm mit Einsatz der Niederhalter ohne Überbiegen.

Es lässt sich somit abschließend sagen, dass die Ebenheit des Profilbodens durch die Auswahl der eingesetzten Methoden einstellbar ist. Eine Gesamtbewertung der eingesetzten Werkzeugsysteme in einer flexiblen Walzprofilieranlage lässt sich über die geforderten Toleranzfelder, wie bei anderen Verfahren, ziehen. Hierbei hängt der notwendige Anlageninvest stark von den Bauteilanforderungen und -eigenschaften ab. Es zeigt sich allerdings auch, dass das hier aufgezeigte Portfolio durch geeignete Kombination auch sehr enge Toleranzfelder zulässt.

7 Verifikation der Strategien

Zur Überprüfung der im Rahmen der Arbeit entwickelten Methoden zur Reduktion der Bodenverwölbung flexibel profilierter, breitenveränderlicher Profile werden in Referenzversuchen zum einen der Effekt von Niederhaltern im Anlagensetup und zum anderen die Strategie des Überbiegens dargestellt.

7.1 Niederhaltersysteme

7.1.1 Konstruktive Umsetzung

Als essentielle Komponente zum Erreichen ebener Profilbauteile mit veränderlicher Breite haben sich Niederhalter herausgestellt. Die Untersuchungen in 6.1 zeigen, dass mittels Niederhaltern vor und hinter den flexiblen Profiliergerüsten die Verwölbung des Profilbodens deutlich reduziert werden kann.

Die Anzahl der Freiheitsgrade und somit notwendigen angetriebenen Achsen beeinflussen maßgeblich die Investitionskosten für eine Gesamtanlage. Beispielhaft bedarf es zur Herstellung der Zielgeometrie bei simultaner Profileinformung (vgl. 6.2.1) insgesamt fünf Biegeschritten. Aufgrund der schmalen Bauteilform ist der letzte Einformschritt jeweils einseitig auszuführen, wodurch sich insgesamt sechs Umformstufen ergeben. Unter der Annahme, dass jede Gerüstseite unabhängig verfahrbar ist, um auch die Flexibilität hinsichtlich asymmetrischer Bauteilformen zu gewähren, summiert sich die Anzahl der angetriebenen Achsen in der Gesamtanlage auf 24 gesteuerte Achsen, wobei dies lediglich die Umformgerüste einschließt. Kommen hierzu noch Niederhalter mit gesteuerten Achsen, steigt die Komplexität einer Gesamtanlage deutlich an. Insofern muss es das Ziel sein, ein möglichst einfaches, kostengünstiges System zu entwickeln.

Zur Abbildung der Verfahrbewegung muss der innere Kontaktkörper, vergleichbar mit den flexiblen Profiliergerüsten, translatorische und rotatorische Freiheitsgrade bereitstellen, um der Profilkontur zu folgen. Hiermit kann die Kraft der Niederhalter möglichst nahe dem Biegeradius eingebracht werden (vgl. 6.1.2). Um diese Anforderungen realisieren zu können, sind die Niederhalter mit einer geeigneten Aktorik auszustatten. Diese kann prinzipiell kraft- oder auch weggesteuert ausgeführt werden. Zur Realisierung einer Wegsteuerung wären vergleichbare Aktoren wie bei den flexiblen Profiliergerüsten notwendig. Somit würde sich die Anzahl der gesteuerten Achsen in einer Gesamtanlage weiter erhöhen. Ein erhöhter Anlageninvest und Aufwand für die Inbetriebnahme wären somit zu erwarten [GRO09]. Als nachteilig betrachtet werden muss hierbei zum einen, dass im Niederhalter somit pro Freiheitsgrad bei vergleichbarer Kinematik wie in [P01] oder [P12] ein Motor mit Frequenzumrichter und Spindel benötigt wird. Zum anderen erfordert ein weggesteuertes

System eine möglichst exakte Positionierung in der Gesamtanlage, da andernfalls durch eine abweichende Verfahrkontur im Vergleich zu den flexiblen Profiliergerüsten der Biegewinkel an den Profilschenkeln negativ beeinträchtigt werden kann. Hier bietet ein kraftgesteuertes selbstjustierendes System, wie in [GRO09] vorgeschlagen, geringere Anforderungen, da ein solches System vergleichbar mit einer schwimmenden Lagerung Fehlstellungen ausgleichen kann. Somit bedarf es einem geringeren Konstruktions- und Montageaufwand, was sich positiv auf die Inbetriebnahme auswirken kann.

Um den Aufwand für zusätzliche gesteuerte Aktuatoren zu reduzieren, können Informationen, welche schon in der flexiblen Profilieranlage vorhanden sind, für die Verfahrbewegung der Niederhalter verwendet werden. Das im Fertigungsprozess befindliche Profil kann hierzu die Funktion eines Steuergliedes übernehmen. Aufgrund der Tatsache, dass die Niederhalterkraft in der Höhenrichtung wirkt, müssen nur verhältnismäßig geringe Kräfte zur Steuerung bereitgestellt werden.

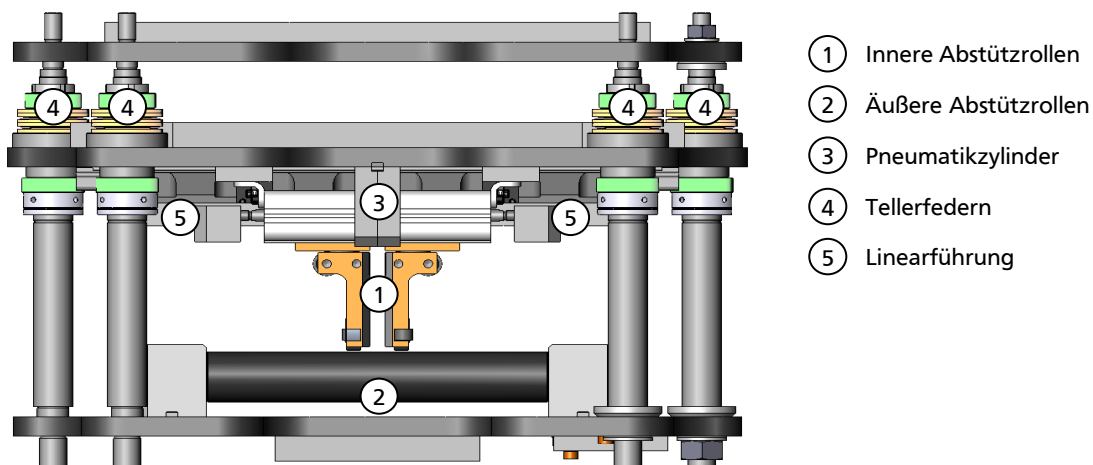


Abbildung 7-1: Aufbau flexibler, kraftgesteuerter Niederhalter

Die translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade sollen mit einer möglichst geringen Anzahl an Aktoren realisiert werden, um den Kostenaufwand gering zu halten. Um dem Blechzuschnitt bzw. der Profilkontur folgen zu können, wird der Niederhalterkörper per Druckzylinder an der Kontur geführt (vgl. Abbildung 7-1). Die Bewegungsrichtung des Niederhalterkörpers ist quer zur Profilierrichtung mit einer Rotation um die Anlagen-Hochachse (8) überlagert. Die Drehung muss durch ein Moment in den Niederhalter eingebracht werden und beidseitig wirken. Somit müssen Führungsrollen (6) vor und hinter der Niederhalterrolle angebracht werden.

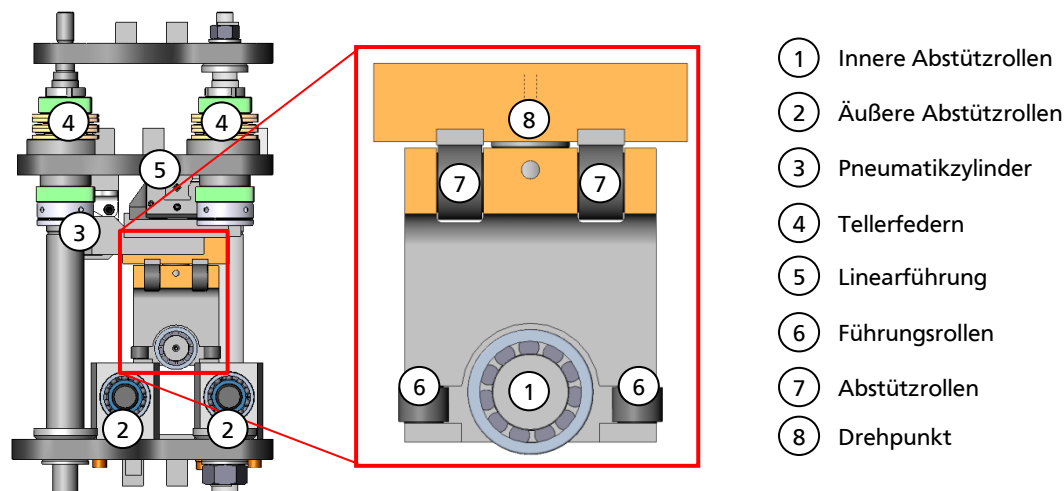


Abbildung 7-2: Seitenansicht flexibler, kraftgesteuerter Niederhalter

Die eigentlichen Niederhalterkräfte werden zwischen den inneren (1) und den äußeren Abstützrollen (2) aufgebracht (vgl. Abbildung 7-2). Um dem Nachteil der geringen Kontaktzone entgegenzuwirken, sind die Abstützkörper in Profilierrichtung zueinander versetzt, wodurch sich eine vergleichbare Abstützung wie bei einer Bandrichtmaschine ergibt. Aufgrund der zu erwartenden Niederhalterkräfte an der inneren Abstützrolle, sind zur Erhöhung der Steifigkeit vier Abstützrollen (7) um den Drehpunkt (8) angeordnet. Diese leiten die Niederhalterkräfte am Lagerbolzen vorbei.

Zur Identifikation des Einflusses der Abstützung sind die äußeren Abstützrollen relativ zur inneren Abstützrolle verstellbar angeordnet. Darüber hinaus ist die gesamte Niederhaltereinheit relativ zu den flexiblen Walzprofiliergerüsten verschiebbar. Neben der Einstellbarkeit der Position der Niederhalterrollen untereinander und der Niederhaltereinheiten relativ zum flexiblen Walzprofiliergerüst ist die Steifigkeit mittels Tellerfedern (4) einstellbar. Die Kraftsteuerung der Position der inneren Abstützrollen wird mittels Pneumatikzylindern (3) bereitgestellt. Diese lassen sich leicht einstellen und bieten aufgrund des großen Luftvolumens im Gesamtsystem eine über der Verfahrbewegung nahezu konstante Kraft quer zur Profilierrichtung. Weiterhin erlauben sie auch die Abbildung starrer Niederhaltersysteme, indem die inneren Abstützrollen in der engen Position verharren.

7.1.2 Verifikation

Zur Validierung des Effektes von Niederhaltern in flexiblen Walzprofilieranlagen wurde als Referenzversuch die Zielgeometrie mit einem Übergangsradius von 500 mm herangezogen. Als zugeschnittene Platine kam Material in ZStE340 mit einer Blechdicken von $t = 1,35$ mm zum Einsatz. Die Anlagenkonfiguration beinhaltet konventionelle Walzprofiliergerüste zur Gewährleistung des Vortriebs und die Einförmung über sechs flexible Umformstufen in den Biegewinkeln $15^\circ/30^\circ/50^\circ/70^\circ/80^\circ$, wobei die 80° Stufe jeweils nur einseitig eingeförmert wird.

Die Niederhalter aus 7.1.1 kommen in den Umformstufen 50°, 70° und 80° zum Einsatz, wobei aufgrund der für die Detektion der Blechposition notwendigen Messräder in der Anlage an der 70° und der zweiten 80° Stufe ausgangsseitig kein Niederhalter möglich ist (vgl. Abbildung 7-3).

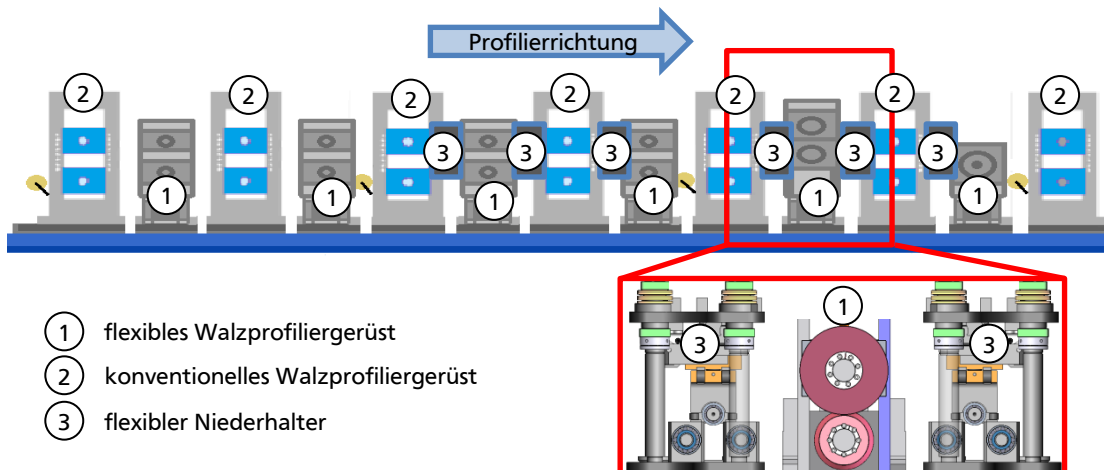


Abbildung 7-3: Anlagenlayout der Referenzversuche mit flexiblen kraftgesteuerten Niederhaltern

Die gefertigten Zielbauteile wurden mittels GOM ATOS III digitalisiert und der Verlauf des Profilbodens ausgewertet. Die Verläufe mit und ohne Niederhalter zeigen die typische lokale Verwölbung in den Übergangsbereichen. Vergleichbar mit den Ergebnissen aus 4.1.4 zeigt sich eine stärkere Längskrümmung der Profilbauteile gegenüber den Verläufen aus der Simulation.

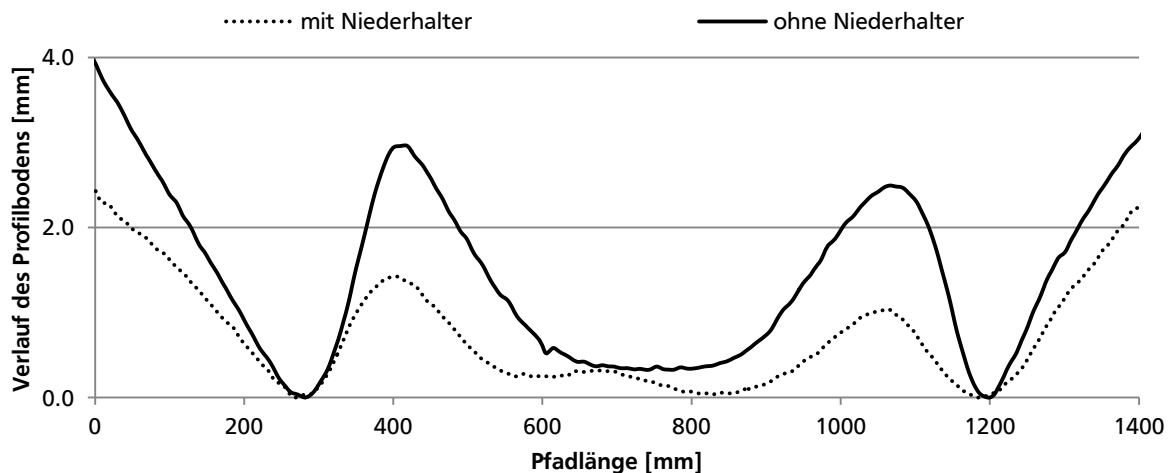


Abbildung 7-4: Vergleich der Bodenverwölbung im Versuch mit Übergangsradius 500mm und ZStE340 in 1,35mm ohne und mit Niederhalter

Die durch den Einsatz von kombiniert translatorisch und rotatorisch verfahrbaren Niederhaltern erreichte Reduktion der Bodenverwölbung liegt für die Aufweitung bei 1 mm

mit Niederhaltern gegenüber 2,4 mm ohne Niederhalter. Für die Verjüngung konnten Werte von 1,4 mm gegenüber 2,8 mm erreicht werden (vgl. Abbildung 7-5).

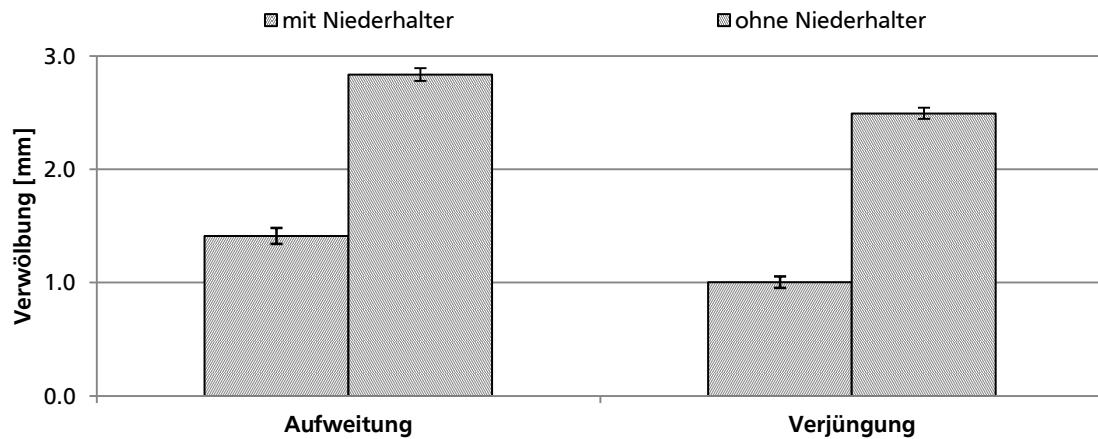


Abbildung 7-5: Vergleich der Bodenverwölbung im Versuch mit Übergangsradius 500mm und ZStE340 in 1,35mm ohne und mit Niederhalter

Wie in 6.1.1.1 beschrieben kann mittels Abstützrollen an der Profillinnenseite die Oberflächenqualität der Profile gegenüber dem Einsatz von Gleitplatten erheblich verbessert werden. Kommt jedoch an den inneren Niederhalterrollen ein zu kleiner Außenradius zum Einsatz, kann hieraus eine Überhöhung der Kontaktnormalspannung an der Kontaktfläche resultieren. Dies kann zum Einwalzen von Spuren auf der Profiloberfläche führen. Abbildung 7-6 zeigt den Vergleich zwischen den resultierenden Spuren beim Einsatz von Niederhaltern mit einem Rollenradius von 0,5 mm im Vergleich zum Referenzversuch mit einem Radius von 3 mm.

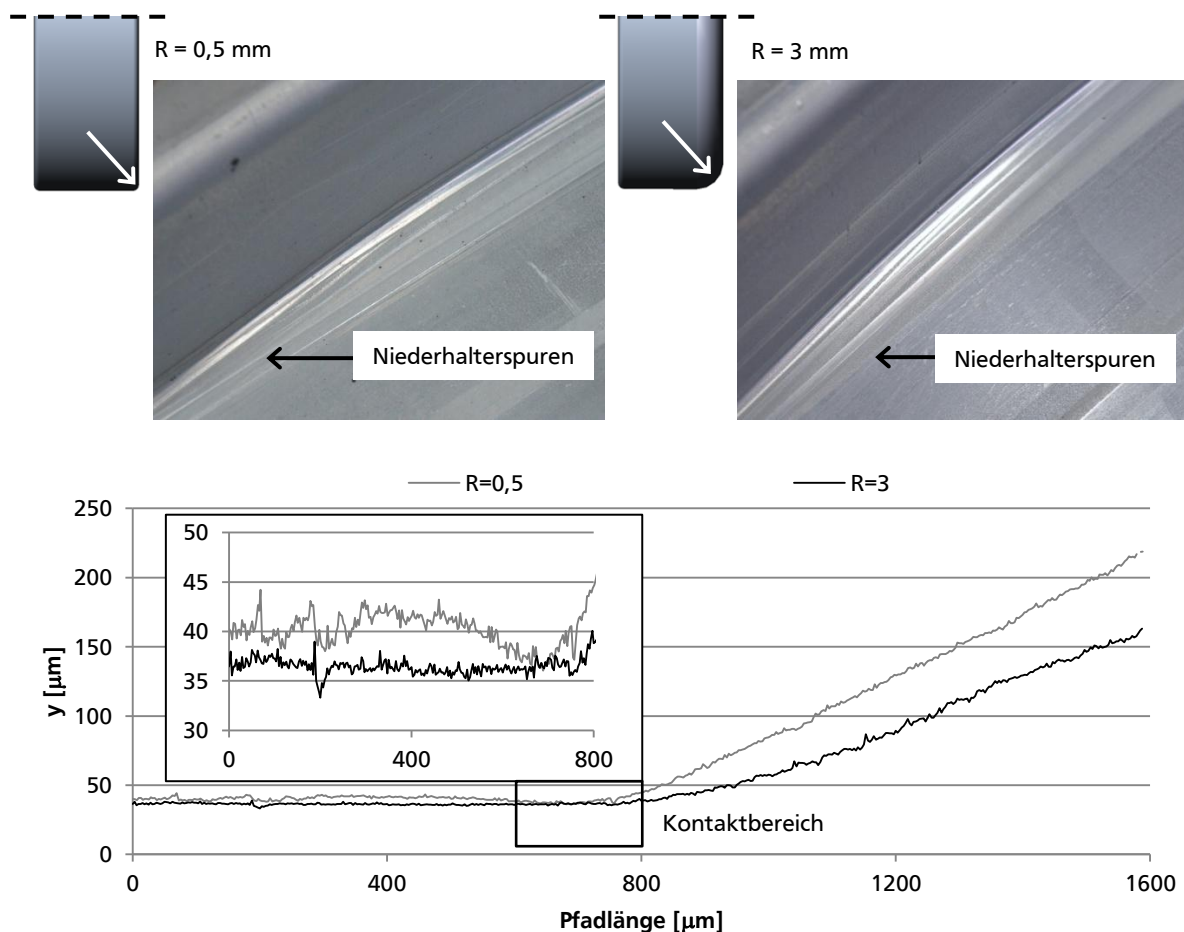


Abbildung 7-6: Profiloberfläche an der Innenseite des Profilbodens nach dem Profilieren mit Niederhaltern mit Radien 0,5 mm und 3 mm an der inneren Abstützrolle

Die Verläufe der Oberflächenmessungen in Abbildung 7-6 zeigen das Oberflächenprofil. In den Verläufen ist zum einen das globale Profil der Oberfläche zu erkennen und zum anderen der Kontaktbereich der Niederhalterrollen. Im globalen Verlauf der Oberfläche ist das Ausbilden der zweiten Biegeante im aufgeweiteten Bereich der Profile durch ein Ansteigen des Verlaufes ab $800\text{ }\mu\text{m}$ zu erkennen (vgl. 6.1.2). Die lokale Betrachtung des Kontaktbereiches zeigt, dass im Gegensatz zur Fertigung mit flächigem, schlupfbehafteten Niederhalterkontakt für beide Radien kaum Beeinträchtigung der Oberflächenbeschichtung auftritt. Zwar ist bei der gefertigten Geometrie mit $R = 0,5\text{ mm}$ ein Absenken der Oberfläche im Kontaktbereich von $500\text{ }\mu\text{m}$ bis $800\text{ }\mu\text{m}$ zu erkennen, dieser Bereich weist jedoch nicht die typischen Überhöhungen an den Rändern eines Kratzers auf. Weiterhin liegt das lokale Absenken der Oberfläche nur im Bereich von ca. $5\text{ }\mu\text{m}$ (vgl. Abbildung 6-3). Im Vergleich hierzu zeigt die Kontaktzone mit dem Außenradius von 3 mm keine lokale Beeinträchtigung des Oberflächenverlaufes. Durch einen gleichmäßigeren Kontaktbereich können die von außen eingebrachten Niederhalterkräfte gleichförmiger in den Profilboden eingebracht werden. Dies bedingt neben der gleichmäßigeren Oberfläche auch im Bereich der Aufweitung

ein besseres Folgen der Profilkontur, speziell in den Niederhalterstufen mit größeren Niederhalterkräften. Die im Kontaktbereich mit $R = 0,5$ mm auftretende lokale Spur erhöht den Kraftbedarf beim Folgen der Profilkontur. Hierdurch kann es bei gleicher Kraft zur Querverstellung zu einem verzögerten Folgen der Niederhalter kommen, wodurch diese im Aufweitungsbereich nicht optimal die Niederhalterkraft nahe dem Profilschenkel einbringen können.

7.2 Überbiegesystem

7.2.1 Konstruktive Umsetzung

Durch die Kombination von Niederhaltern beim flexiblen Walzprofilieren und einer gezielten Erhöhung der Längsdehnung in den Übergangsbereichen soll die Profilgenauigkeit beeinflusst werden. Hierzu kommt eine Kombination aus flexiblem Walzprofilieren und lokalem Überbiegen der Profilschenkel zum Einsatz. Eine zum gesteuerten Überbiegen entwickelte Aktorik wurde in [HEN09] beschrieben. Dieses System wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit dem Prinzip des flexiblen Walzprofilierens kombiniert. Wie in 5.2 aufgezeigt, bietet die flexible Walzprofilieranlage am PtU die Möglichkeit, unterschiedliche Werkzeugträger auf der Kinematik aufzunehmen. Das entwickelte Überbiegesystem erlaubt, den Biegewinkel in der eingesetzten Umformstufe um bis zu 18° zu erhöhen. Vergleichbar mit dem Werkzeugsystem aus [HEN09] liegt der Drehpunkt (1) im Zentrum des unteren Biegeradius (vgl. Abbildung 7-7). Ober- (2) und Unterrolle (3) sind in einem schwenkbaren Rahmen gemeinsam angeordnet und ermöglichen ein gleichzeitiges Überbiegen von Profilschenkel und -flansch. Eine Einstellung der Blechdicke geschieht über die Unterrolle, um mit dem unteren Biegeradius an der Oberrolle den Drehpunkt im Falle einer Blechdickenanpassung nicht zu verlassen. Die Führung des Rahmens wird über eine Kreisbogenführung (4) realisiert, die über die Koppelstange mit dem Lineartisch (5) verbunden ist, um die translatorische Verbahrbewegung des Tisches in eine Schwenkbewegung umzuwandeln. Der Antrieb wird wie an den Kinematiken der flexiblen Gerüste über einen Servomotor bereitgestellt.

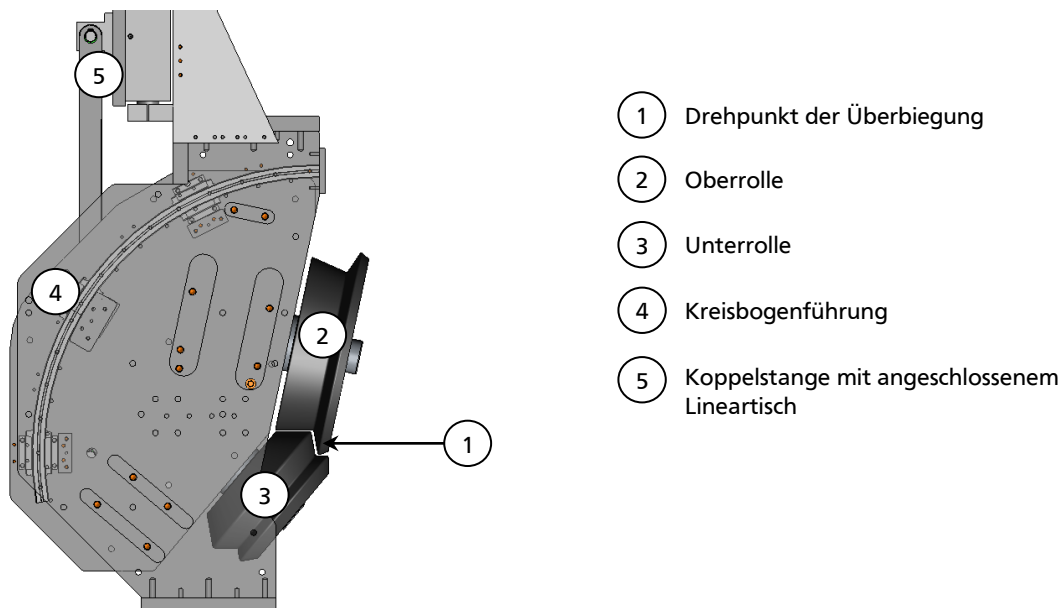


Abbildung 7-7: Überbiegestufe für das lokale Erhöhen des Biegewinkels beim flexiblen Walzprofilieren

Das lokale Überbiegen der Profilschenkel im Übergangsbereich wird in der vorletzten Profilierstufe eingesetzt. Das Überbiegegerüst ist in seiner Ausgangsposition auf einen Biegewinkel von 80° eingestellt und kann den Profilschenkel auf einen Gesamtwinkel von bis zu 98° überbiegen. Hierdurch werden lokal in den Übergangsbereichen Längsdehnungen sowohl im Zug- als auch im Druckbereich über das im Anlagensetup mögliche Maß erhöht. Dabei wird das Ziel verfolgt, eine einstellbare Profilgeometrie hinsichtlich der Verwölbung des Profilbodens zu erreichen. In einer folgenden Stufe wird das Profil dann durch eine konventionelle 80° Stufe auf die Zielgeometrie kalibriert. Die eingebrachten Längsdehnungen sollen dabei möglichst erhalten bleiben und nur noch der Winkel der Profilschenkel und Stege eingestellt werden. Das Anlagenlayout mit lokaler Überbiegestufe ist in Abbildung 6-40 dargestellt.

7.2.2 Verifikation

Im Rahmen der Valdierungsversuche wurden Profilbauteile, welche mit dem Anlagensetup aus Abbildung 7-3 hergestellt wurden, in einem zweiten Profilervorgang weiterverarbeitet. Im zweiten Profilervorgang werden die Profilschenkel in den jeweils einseitigen Überbiegestufen nach der Profilierstrategie S1 lokal auf 90° in den Übergangsbereichen überbogen und abschließend in den Kalibrierstufen auf 80° zurückgebogen. Überbiegestrategie S1 wurde gewählt, da als zugeschnittenes Platinenmaterial TRIP700 mit einer Blechdicke von 1,35 mm zum Einsatz kommt. Wie jedoch unter 6.2.4 gezeigt, liegen die nur mittels Niederhalten induzierten Längsdehnungen sowohl im Zug- als auch im Druckbereich deutlich unter denen mit Materialgüten geringerer Streckgrenze. Um effektiv in

beiden Bereichen die Längsdehnungen zu erhöhen und somit die Bodenverwölbung zu reduzieren, soll im Rahmen der Validierungsversuche der gesamte Übergangsbereich überbogen werden. Ausgangsprofil ist die Zielgeometrie mit einem Konturradius von 1300 mm. Um den Einfluss eines zweiten Profilervorgangs zu eliminieren, wurde jeweils auch der Referenzversuch ohne lokales Überbiegen einem zweiten Anlagendurchlauf durch die Konfiguration aus Abbildung 6-7 unterzogen.

Wie zuvor beschrieben wurden die gefertigten Profilbauteile mittels GOM ATOS III digitalisiert und vermessen. Abbildung 7-8 zeigt den Verlauf des Profilbodens vom Referenzversuch gegenüber dem Versuch mit lokalem Überbiegen der Übergangsbereiche.

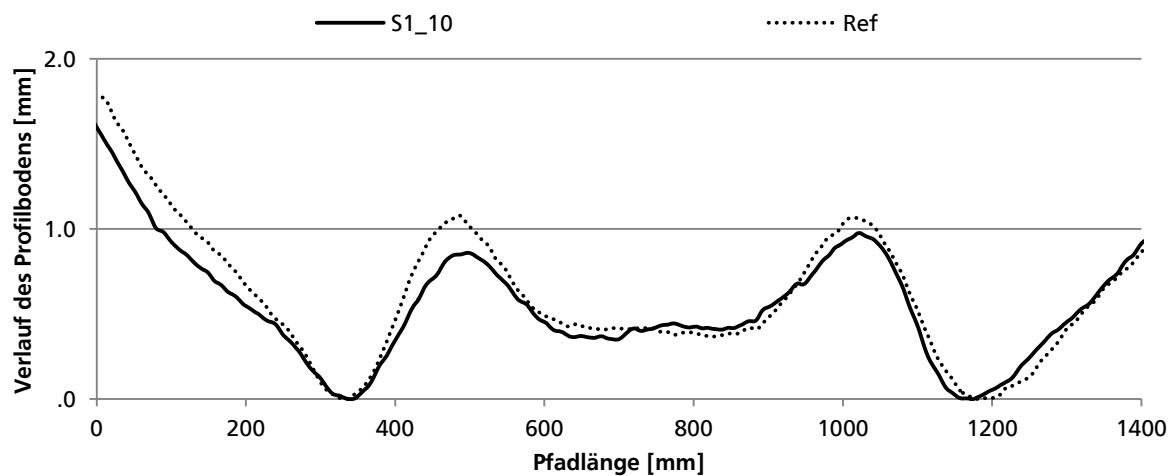


Abbildung 7-8: Vergleich der Bodenverwölbung im Versuch mit Übergangsradius 1300mm und TRIP700 in 1,35mm ohne Überbiegen und mit Überbiegen um 10° in der 80° Stufe und abschließendem Kalibrieren auf 80°

Bei der Auswertung der Referenzgeometrie zeigt sich eine lokale Verwölbung des Profilbodens in den Übergangsbereichen von 1,05 mm bei der Aufweitung und von 1 mm bei der Verjüngung vom breiten hin zum schmalen Profilbereich. Mittels zusätzlichen Überbiegens kann dies noch um weitere 13% im Bereich der Aufweitung und um 10% im Bereich der Verjüngung reduziert werden.

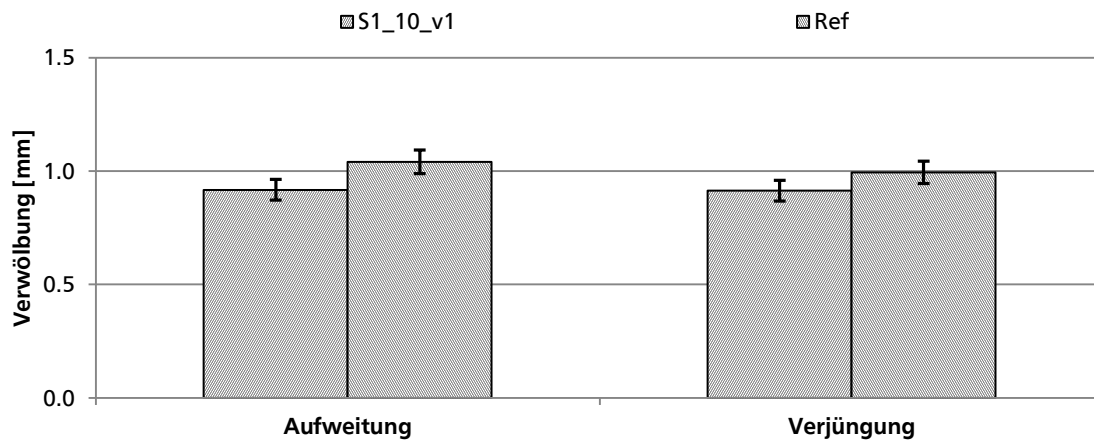


Abbildung 7-9: Vergleich der Bodenverwölbung im Versuch mit Übergangsradius 1300mm und TRIP700 in 1,35mm ohne Überbiegen und mit Überbiegen um 10° in der 80° Stufe und abschließendem Kalibrieren auf 80°

Es bestätigt sich demnach in den Referenzversuchen die mögliche Verbesserung, welche sich aus einem Prozesseingriff mittels Überbiegen in der vorletzten Stufe bietet. Weiterhin zeigt sich, dass die Kombination von Niederhaltern mit vergrößertem Übergangsradius und aktivem Prozesseingriff eine Verwölbung des Profilbodens von unter 1 mm zulassen. Es bietet sich dementsprechend die Möglichkeit durch die geeignete Kombination der vorgeschlagenen Methoden auch enge Toleranzfelder zu erfüllen.

8 Auslegungsrichtlinien zur Prozessgestaltung und Verfahrensbewertung

8.1 Grundsätzliche Verfahrensauslegung

Nach Kapitel 6 bieten sich zur Steuerung der Profilqualität mehrere Einflussmöglichkeiten an. Hierzu können bekannte Strategien über die Werkzeuggestaltung in Anlehnung an das konventionelle Walzprofilieren wie auch für das flexible Walzprofilieren spezifische Strategien verfolgt werden. Die im Rahmen der Arbeit vorgestellten Strategien zielen darauf ab, Längsdehnungen in den Übergangsbereichen entscheidend zu erhöhen, um ungewollte Verwölbungen in den Übergangsbereichen flexibel rollprofilierter Bauteile zu verringern.

Als entscheidende Komponente zur Qualitätssteigerung haben sich im Rahmen der vorliegenden Arbeit Niederhalter herausgestellt. Aufgrund der eingeschränkten Kontaktsituation beim Walzprofilieren sind die Möglichkeiten, Längsdehnungen in das Profil einzubringen, stark beschränkt. Ziel muss es dementsprechend sein, die Kontaktbereiche zwischen Werkzeug und Profil zu vergrößern. Somit bestehen dann Möglichkeiten, durch die Erhöhung der Kontaktbereiche äußere Kräfte in das Profil einzubringen. Bei der Entwicklung solcher Niederhaltereinheiten ist spezielles Augenmerk auf die Kontaktverhältnisse zwischen Halbzeug und Werkzeug zu legen. Aufgrund des hohen Kraftniveaus und der ggf. sehr lokalen Werkzeugkontakte resultieren hohe Kontaktnormalspannungen. In Verbindung mit auftretendem Schlupf kann während der Umformung die Halbzeugoberfläche beschädigt werden. Während reine Gleitelemente zu erheblichem abrasiven Verschleiß an Profil und Werkzeug führen, ist es möglich, durch den Einsatz von Rollen vergleichbare Kontaktbedingungen wie beim Walzprofilieren zu schaffen oder mittels in Profilierrichtung verfahrbarer Niederhalter Schlupf zu vermeiden. Bei der Auslegung eines wie im Rahmen der Arbeit vorgeschlagenen Niederhaltersystems bietet es sich an, die Kontaktbereiche des Niederhaltersystems am inneren Profilboden vergleichbar mit denen der Profilierrollen der flexiblen Walzprofiliergerüste zu gestalten. Hierdurch ergeben sich beim fertigen Profil gleichwertige Oberflächenqualitäten wie bei konventionell rollprofilierten Bauteilen. Für die Bauteilgeometrie entscheidend haben sich die Verfahrbewegung der Kontaktkörper des selbstjustierenden Niederhalters, die Anzahl der Niederhalter und deren Abstand zum flexiblen Profilierrüst herausgestellt. So zeigt sich, dass bei nicht verfahrbaren inneren Niederhalterkontaktkörpern die Bogenbildung durch ungleichmäßig ausgeformte Biegewinkel im Übergangsbereich begünstigt werden kann. Speziell in den Übergangsbereichen erweist sich die Verfahrbewegung der Niederhalter als entscheidend, da es hier aufgrund der Längsspannungen in den Profilschenkeln während der Umformung zum Ausbilden einer ungewollten Biegekante im Profilboden kommen kann. Durch die Verfahrbewegung der inneren Kontaktkörper können die Kräfte effizienter in das Halbzeug eingebracht und unerwünschte Profildeformationen vermieden werden. Im Gegensatz zu starren Niederhaltern

geschieht die Krafteinleitung bei verfahrbaren Niederhaltern somit nächstmöglich am eingeformten Profilschenkel und muss nicht über längere Strecken durch den Boden geleitet werden. Dies erscheint im Speziellen dann von erhöhter Wichtigkeit, wenn Profilbauteile mit großer Aufweitung gefertigt werden sollen. Hier erreicht dann das wirkende Biegemoment um den Kontaktkörper Größenordnungen, welche zum Ausbilden einer plastischen Biegekante führen können.

Da das Profil während der Einförmung in den Freiräumen zwischen Niederhalter und flexiblem Gerüst eine energetisch günstige Position einnehmen kann, sind diese möglichst zu minimieren. Hierbei kann es allerdings zu einem Zielkonflikt zwischen möglichst geringem Abstand zwischen Niederhalter und flexiblem Profiliergerüst und möglichen Kollisionen aufgrund der Schwenkbewegung der flexiblen Gerüste kommen. Eine entscheidende Position nimmt hierbei wiederum die Lage des Drehpunktes der flexiblen Gerüste ein. Während ein nach außen verlagerter Drehpunkt durch den größeren zur Verfügung stehenden Bauraum Vorteile hinsichtlich Gerüststeifigkeit bieten kann, verhindert dies jedoch im Gegenzug aufgrund der dann größeren Schwenkbewegung ein nahes Positionieren der Niederhalter. Hierbei können je nach Profilgeometrie integrierte Lösungen, bei denen Niederhalter und flexibles Gerüst eine Einheit bilden, vielversprechende Ansätze liefern (Abbildung 8-1).

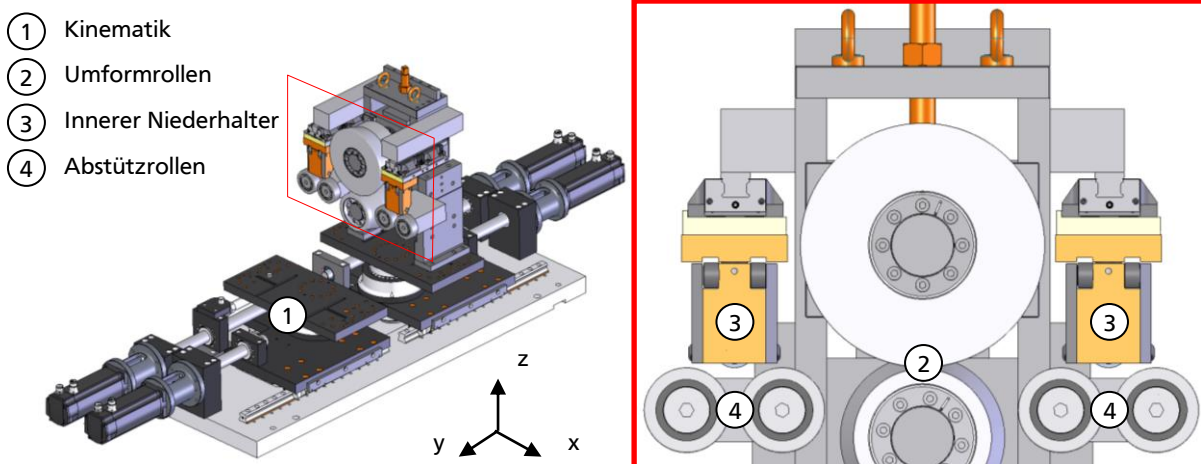


Abbildung 8-1: In die flexiblen Profiliergerüste integriertes Niederhaltersystem mit schwenk- und verfahrbaren inneren Niederhalterkörpern.

Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass es zwischen den Umformrollen und den Niederhaltern zu einer Relativbewegung quer zur Profilierrichtung im Übergangsbereich kommt. Somit müssten trotz der Integration der Niederhalter in die flexiblen Gerüste entsprechende Freiheitsgrade vorgesehen werden. Die Antriebe hierfür können jedoch, um den Aufwand zu minimieren als kraftgesteuerte, selbstjustierende Einheiten ausgeführt werden.

Als entscheidend für die Profilgeometrie erweisen sich die letzten Umformstufen. Der Einsatz von Niederhaltern dort zeigt sich im Rahmen der Untersuchungen als besonders effektiv,

wohingegen er in den ersten Stufen einen nur geringen Einfluss hat. Hieraus ergeben sich in der Anlagenplanung Einsparmöglichkeiten. Da die Längsdehnungen in den Profilschenkeln in den ersten Umformstufen nur sehr gering ausfallen und die Profilform hinsichtlich der Bodenverwölbung noch nicht stark ausgeprägt ist, kann hier auf Niederhalter verzichtet werden. Im vorliegenden Beispiel zeigt sich beim Einsatz der Niederhalter, dass erst in der Stufe 3 bis 4 effektiv auf die finale Profilform Einfluss genommen wird. Der Einsatz von Niederhaltern ausschließlich in der letzten Stufe zeigt jedoch größere Geometrieabweichungen. In den zuvorliegenden Umformstufen wird dementsprechend Einfluss auf die Längsdehnungen und somit auch auf die Profilgeometrie genommen. Untersuchungen zum effektiven Einsatz von Niederhaltern können somit entscheidend zur Minimierung der Anlagenkomplexität und des Invests beitragen.

Wie sich bei der Untersuchung unterschiedlicher Geometrie- und Werkstoffparameter gezeigt hat, bedingt der Einsatz von reduzierter Blechdicke oder auch von Werkstoffen mit erhöhter Streckgrenze Anpassungen gegenüber der vorgeschlagenen Werkzeugkonfiguration. Exemplarisch zeigt Abbildung 8-2 ein solches Werkzeugsystem. Zusätzlich zu der in 6.1.1 vorgeschlagenen Konfiguration, kommt hier in der letzten Umformstufe ein- und ausgangsseitig jeweils eine zusätzliche innere und äußere Niederhalterkontaktrolle zum Einsatz, wobei die inneren Kontaktrollen jeweils translatorisch und rotatorisch verfahrbar sind. Hierdurch wird ein vergrößerter Kontaktbereich der Niederhalter erzielt. Abbildung 8-2 vergleicht die Bodenverwölbung an einem Bauteil der Zielgeometrie mit einem Übergangsradius von 500 mm und TRIP 700 in einer Blechdicke von 1,35 mm. Bei allen Bauteilen wurden Niederhalter der Konfiguration aus 6.1.1 in den Stufen 3 und 4 eingesetzt. Hierbei kamen Niederhalterabstände von 200 mm bzw. 300 mm zum Einsatz. Die Umformstufe 5 wurde bei den fett schraffierten Varianten mit jeweils entsprechend 6.1.1 profiliert, während die fein schraffierte Variante mit einer Konfiguration nach Abbildung 8-2 profiliert wurde, wobei der minimale Abstand der Niederhalter vom Profiliergerüst nicht weiter verringert wurde. Trotz des verhältnismäßig geringen zusätzlichen Aufwandes, konnte hiermit eine weitere Reduktion der Verwölbung erzielt werden.

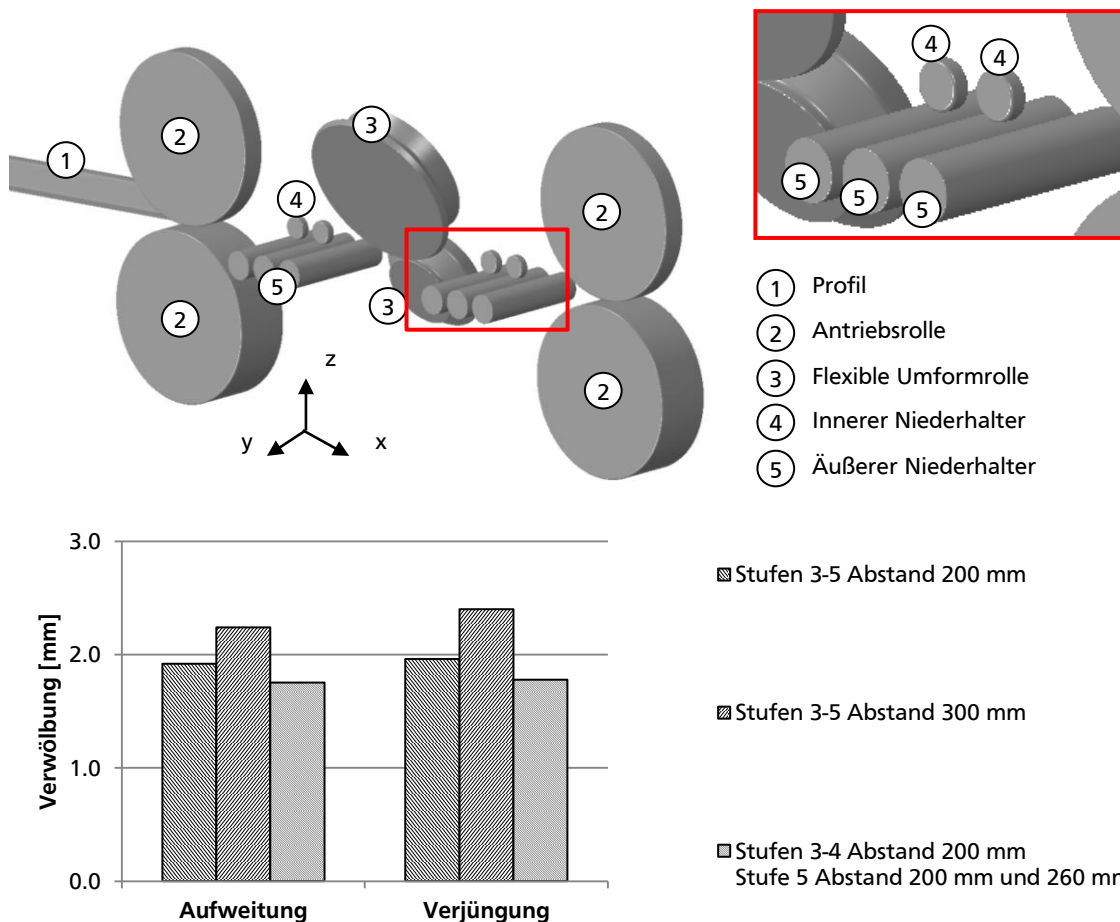


Abbildung 8-2: Werkzeugkonfiguration mit zwei, in Reihe angeordneten Niederhaltern und Verwölbung des Profilbodens bei entsprechender Installation in der letzten Umformstufe

In Kombination mit Niederhaltern in flexiblen Profilieranlagen ist es weiterhin über die geeignete Wahl der Einformstrategie möglich, auch für das flexible Walzprofilieren charakteristische Formfehler zu reduzieren. Die Längsdehnungen am Profilschenkel in den Übergangsbereichen hängen deutlich von der Einformstrategie ab. Am Hutprofil zeigt sich beispielhaft, dass bei der Einformung der Flansche vor dem Profilschenkel deutlich geringere Längsdehnungen in den Profilschenkel eingebracht werden können. Der zuerst eingeformte Flansch versteift die Profilstruktur, wodurch in der folgenden Einformung Längsdehnungen im Profilschenkel vermieden werden. Werden hingegen die Profilschenkel zuerst eingeformt, können Längsdehnungen besser induziert werden. Bei dieser Methode bedingt die spätere Einformung des Flansches jedoch lokale Abweichungen des Biegewinkels in den Übergangsbereichen, wodurch sich die Ebenheit der Flansche verschlechtert. Als geeignete Einformstrategie bietet sich die gleichzeitige Einformung von Schenkel und Flansch in gleichen Biegewinkelstufen an. Die Längsdehnungen im Übergangsbereich wie auch die Ebenheit des Profilbodens erreichen die Größenordnung derer mit sequentieller Einformung (1), die Ebenheit der Profilflansche ist jedoch besser. Darüber hinaus reduziert sich bei der

simultanen Einformung von Profilschenkel und Flansch die Anzahl der notwendigen Biegewinkelstufen. Mit fünf gegenüber neun Umformstufen kann somit der Invest für die Anlage und Werkzeuge deutlich reduziert werden.

Neben diesen Methoden kann auch mittels aktiven Prozesseingriffs die Profilqualität beeinflusst werden. Sowohl mit dem Einsatz von Niederhaltern als auch mittels Anpassung der Einformstrategien kann nur passiv die Profilqualität beeinflusst werden. Die über das Profil unterschiedlichen Formänderungen stellen jedoch auch über den Profilierprozess unterschiedliche Anforderungen an die formgebenden Werkzeuge. So finden sich für das flexible Walzprofilieren verschiedene Ansätze, während der Umformung mit aktiven Komponenten die Profilgeometrie zu beeinflussen. Hier zeigt sich, dass gerade bei hoch- und höchstfesten Stählen die vorgeschlagenen passiven Strategien als nicht ausreichend erscheinen, um Geometrien in engen Toleranzfeldern zu realisieren. Während in [LAR11] Untersuchungen zur thermischen Prozessunterstützung durchgeführt wurden, befassen sich Anlagenkonzepte in [ONA10], [FAG09], [LIN09a] und [P05] mit mechanischen Prozesseingriffen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde als gesteuerte Kalibrierung der Profilgeometrie ein Prozesseingriff mittels lokalen Überbiegens vorgestellt. Hierdurch lassen sich Längsdehnungen in den Übergangsbereichen gezielt steigern, welche einen entscheidenden Einfluss auf die finale Bauteilgeometrie hinsichtlich der Bodenverwölbung haben. Es konnte bei der Entwicklung unterschiedlicher Überbiegestrategien gezeigt werden, dass sich in Verbindung mit den eingesetzten Niederhaltern speziell das Überbiegen der Zugbereiche zur Reduktion der Bodenverwölbung eignet. Aufgrund der Kontaktverhältnisse zwischen Niederhalter und Profil und der daraus resultierenden Abstützung des Bauteils während der Umformung kommt es zu einem höheren Niveau der Längsdehnungen in den Druck- gegenüber den Zugbereichen. Diese können jedoch mittels lokalem Prozesseingriff dahingehend beeinflusst werden, dass sie ein gleiches Niveau wie in den Druckbereichen erreichen. Entsprechend konnte jedoch auch gezeigt werden, dass ein Überbiegen des gesamten Übergangsbereichs sogar zu einer Verschlechterung der Bauteilgeometrie führen kann.

Abschließend kann geschlussfolgert werden, dass die Bauteilqualität den Geometrieforderungen entsprechend angepasst werden kann. Toleranzfelder bestimmen entscheidend den notwendigen Aufwand für eine Gesamtanlage. Während bei Profilbauteilen in weichen Stahl- oder Aluminiumgüten und weiten Toleranzanforderungen nur eine geeignete Profilblumenauslegung als ausreichend erscheint, müssen mit steigender Werkstofffestigkeit und wachsenden Toleranzanforderungen weitere Komponenten in eine flexible Profilieranlage integriert werden. Es zeigt sich allerdings auch, dass durch geeignete Kombination der Methoden auch enge Toleranzklassen an komplexen Profilen darstellbar sind.

8.2 Bewertung des Verfahrens

Durch die Erweiterung der geometrischen Gestaltungsmöglichkeiten walzprofilierter Bauteile mittels flexiblen Walzprofilierens lassen sich Profilbauteile herstellen, welche bislang nur mit abbildenden Verfahren produzierbar waren. Technologisch bietet das konventionelle Walzprofilieren speziell bei der Verarbeitung von Stahlgütern mit einer Streckgrenze größer 800 MPa Vorteile gegenüber klassischen Tiefziehprozessen [HEI07]. Hier lassen sich mit verhältnismäßig geringem Aufwand Rückfederungseffekte kompensieren. Darüber hinaus bietet das konventionelle Walzprofilieren Kostenvorteile hinsichtlich der Materialkosten. Während beim konventionellen Walzprofilieren der Materialausnutzungsgrad bei bis zu 100% liegt, ergibt sich bei Zug-/Druckumformverfahren ein Ausnutzungsgrad von lediglich ca. 60% [FÜL10]. Gerade bei großen Stückzahlen können die Materialkosten jedoch einen entscheidenden Einfluss auf die Stückkosten haben [SWE03]. Bei einer geeigneten Wahl des Bandzuschnitts beim flexiblen Walzprofilieren können auch hier deutliche Kostenvorteile entstehen. Beispielsweise ergibt sich bei der Zielgeometrie unter der Annahme, dass als Zuschnitt nur die Verjüngung des Bauteils besäumt werden muss, eine Materialausnutzung von ca. 94%. Dies würde im Idealfall auch der Materialausnutzung eines tiefgezogenen Bauteils mit Zuschnitt vom Coil entsprechen, wobei nach dem Tiefziehen in der Regel noch nach [SMI90] nachgelagert beschnitten wird, wodurch in diesem Fall breiteres Blechband eingesetzt werden müsste.

Bei kleinen bis mittelgroßen Serien hingegen haben die Investitionskosten einen deutlichen Einfluss auf die Stückkosten. Die beim Walzprofilieren verhältnismäßig geringen Werkzeugkosten erlauben somit auch die wirtschaftliche Fertigung solcher Losgrößen. In diesem Rahmen kommt auch die Flexibilität des Walzprofilierens zur Herstellung von Bauteilfamilien zum Tragen. Das konventionelle Walzprofilieren bietet hier die Möglichkeit, unterschiedliche Bauteillängen ohne Werkzeugwechsel zu realisieren. Darüber hinaus ermöglicht das flexible Walzprofilieren noch die Anpassung der Querschnittsgeometrie lediglich durch Anpassen der Verfahrensbewegungen an den Profiliergerüsten (vgl. Abbildung 2-5). Hierdurch erscheinen in Kombination mit flexibel konfigurierbaren Besäumeinheiten wie beispielsweise dem Laserschneiden, Plasmaschneiden oder variabel verfahrbaren Rollmessern kleinste Losgrößen als wirtschaftlich möglich.

In [LIN09a] konnte im Rahmen einer Versuchsreihe mit querschnittsveränderlichen Profilen eine sehr gute Reproduzierbarkeit des Verfahrens festgestellt werden. Hierbei wurden 50 Profile eines Typs mittels GOM ATOS vermessen und diskrete Messbereiche ausgewertet. Die Standardabweichung für die vermessenen Bauteile lag im Rahmen der Untersuchungen unter 0,3 mm, wodurch abhängig von den Toleranzanforderungen auf eine gute Prozessfähigkeit geschlossen werden kann. Vergleichbares zeigte sich im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen, wo sich die versuchstechnisch ermittelten Werte für die Bodenverwölbung auf $\pm 0,05$ mm reproduzierbar einstellen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung von Strategien zur Optimierung der Bauteilqualität bei breitenveränderlichen Hutprofilen, welche mittels flexiblen Walzprofilierens darstellbar sind. Im Rahmen bisheriger Arbeiten wurden die grundlegende Machbarkeit und die Auslegung des Fertigungsprozesses an U-Profilen untersucht. Für die Auslegung dieses Profiltyps ist die faltenfreie Herstellbarkeit verfahrenskritisch. Gegenüber U-Profilen bieten Hutprofile ein größeres Anwendungsspektrum im Fahrzeugbau. Die Realisierung dieses Profiltyps mittels flexiblen Walzprofilierens in engen Toleranzen ist im Fokus der vorliegenden Arbeit.

Als Grundlagen waren zu Beginn der Arbeit entscheidende Verfahrenscharakteristika bekannt, welche sich bei der Fertigung von U-Profilen mit breitenveränderlichen Querschnitten gezeigt haben. Als charakteristische Verfahrensgrenzen haben sich die Faltenbildung in den Druckbereichen des Profilschenkels und die lokale Verwölbung des Profils gezeigt. Speziell diese zeigt sich bei komplexeren Profilbauteilen als entscheidend für den Einsatz flexibel profilierter Bauteile in Rahmenstrukturen, da eine Ebenheit des Profils die Eignung für Fügeprozesse an Profilflansch oder -boden maßgeblich beeinflussen kann. Untersuchungen im Rahmen der Arbeit haben Aufschluss hinsichtlich der Entwicklung der Profilverwölbung in den Übergangsbereichen breitenveränderlicher Hutprofile gegeben.

Neben Untersuchungen auf den im Rahmen des Projektes PROFORM entwickelten Anlagen zum flexiblen Walzprofilieren wurde zur Steigerung des Prozessverständnisses ein FEM Modell zum flexiblen Walzprofilieren entwickelt. Aufgrund der Problemgröße von Walzprofiliermodellen wurde eine Strategie zur Reduktion dieser verfolgt, um somit Rechenzeit in der Simulation zu reduzieren. Zum Abgleich der Simulationmethode wurden die Ergebnisse zum einen mit einer konventionell aufgebauten Simulation und zum anderen mit Versuchsergebnissen abgeglichen. Hierzu kamen die Auswertung der Geometrie mittels GOM ATOS und die optische Dehnungsermittlung mittels GOM ARGUS zum Einsatz. Es konnte gezeigt werden, dass die charakteristischen Effekte mit dem Simulationsmodell gut abgebildet werden. Gleichzeitig bietet die Ausführung der Simulation mit Berechnung einzelner Umformstufen entscheidende Rechenzeitvorteile. Die Methode lässt sich auch für große Walzprofiliersimulationen nutzen, indem Einzelsequenzen des Prozesses in kleineren Simulationsmodellen berechnet werden.

Zur Optimierung der Maßhaltigkeit wurden im Rahmen der Arbeit drei verschiedene Ansätze verfolgt. Zum einen wurden Methoden der Werkzeuggestaltung in Anlehnung an das konventionelle Walzprofilieren untersucht, wobei sich exemplarisch an der untersuchten Bodenverwölbung zeigt, dass sich durch geeignete Stufenfolgenplanung und Einformstrategie die Anzahl notwendiger Umformstufen entscheidend reduzieren lässt. Zum anderen wird ein

Niederhaltersystem vorgeschlagen, welches die Einformung breitenveränderlicher Profile dahingehend unterstützt, dass in den Übergangsbereichen notwendige Längsdehnungen eingebracht werden können. Hierdurch kommt es zu einer deutlichen Reduktion der Profilbodenverwölbung. Um den Kostenaufwand für eine Gesamtanlage hierdurch nicht übermäßig zu erhöhen, wurden diese als konturfolgende, kraftgesteuerte Einheiten entwickelt. Ziel hierbei war auch die Reduktion des Aufwands bei der Inbetriebnahme [GRO09].

Im Gegensatz zum konventionellen Walzprofilieren zeigt sich, dass sich aufgrund der Querschnittsveränderung der Profile auch die Anforderungen an die eingesetzte Werkzeugtechnik über die Profillänge ändern. Um dem gerecht zu werden, wurde ein gesteuertes Überbieegerüst entwickelt. Dieses ermöglicht ein lokales Anpassen des Biegewinkels zur gezielten Beeinflussung der Längsdehnungen in den Übergangsbereichen. Hierdurch kann, über die erreichbare Profilebenheit mit dem ausschließlichen Einsatz von Niederhaltern hinaus, eine weitere Verbesserung erzielt werden. Entsprechend der geforderten Geometrie- und Materialeigenschaften für eine breitenveränderliche Profilgeometrie kann mit den vorgeschlagenen Strategien eine Anlagenkonfiguration erarbeitet werden, wobei sich die Komplexität dieser stark an den Toleranzanforderungen orientiert. Während bei einfachen Bauteilen unter Umständen nur eine Auswahl geeigneter Einformstrategien ausreichend sein kann, ist bei Bauteilen mit hohen Toleranzanforderungen zumindest der Einsatz von Niederhaltern, wenn nicht auch der Einsatz eines gesteuerten Prozesseingriffs, notwendig.

Als Fortführung der vorgeschlagenen Strategien wären weiterführende Untersuchungen hinsichtlich einer Sensitivitätsanalyse gesteuerter Prozesseingriffe beim flexiblen Walzprofilieren von Interesse. Da die Einformlänge beim Profilieren von Geometrie- und Werkstoffparametern abhängig ist, kann somit auch auf eine Abhängigkeit einer geeigneten Überbiegestrategie von diesen Parametern geschlossen werden. Weiterhin erscheint der Zeitpunkt des aktiven Prozesseingriffs mittels Überbiegen von Interesse. Da sich die Längsdehnungen über den Profiliervorgang hinweg entwickeln, kann auch durch die Anzahl und Position des aktiven Prozesseingriffs die Profilgenauigkeit beeinflusst werden. Hierbei ist jedoch darauf zu achten, dass mit der Erhöhung der Anzahl von Überbiegeachsen in der Anlage eine weitere Steigerung der Anlagenkomplexität einhergeht. Darüber hinaus wäre in weiterführenden Untersuchungen der Einsatz höhenveränderlicher Kinematiken zur Darstellung von höhenveränderlichen Profilen von Interesse. Diese Profiltypen haben ein großes Anwendungsspektrum im Fahrzeugbau und lassen sich derzeit basierend auf Walzprofilieren nur mit aufwändigen Zusatzoperationen darstellen [P11]. Da die Wettbewerbsfähigkeit eines solchen Verfahrens in starkem Maße auch vom Anlageninvest beeinflusst ist, müsste der Fokus auf eine einfache Werkzeugkinematik gelegt werden. Dementsprechend müsste bei der Entwicklung von Werkzeugsystemen besonderes Augenmerk auf die Komplexität einer solchen Anlage gerichtet werden.

10 Quellenverzeichnis

10.1 Literaturverzeichnis

- [ABQ610] Abaqus 6.10, Abaqus Analysis User's Manual.
- [ABE08] Abee, A.; Berner, S.; Sedlmaier, A.: "Accuracy improvement of roll formed profiles with variable cross sections", In: ICTP 2008 - 9th International Conference on Technology of Plasticity, Gyeongju, Korea, pp. 520-527, 2008.
- [ABE09] Abee, A.; Sedlmaier, A.: Development of Roll Forming Applications by means of Numerical Analysis as a part of Quality Control, Proceedings of 1st International Congress on Roll Forming: RollFORM '09, Bilbao 2009.
- [ABR11] Abrass, A.; Özel, M.; Groche, P.: Accelerating the FE-Simulation of Roll Forming Processes with the Aid of specific Process's Properties, Proceedings of The 8th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes, Korea, pp. 962-969, 2011.
- [BAT02] Bathe, K.J.: Finite-Elemente-Methoden, 2., vollständig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2002.
- [BER11] Berner, S.; Storbeck, M.; Groche, P.: A Study on Flexible Roll Formed Products Accuracy by Means of FEA and Experimental Tests, Proceedings of Esaform 2011 - The 14th International Esaform Conference on Material Forming, Belfast, UK, pp. 345-350, 2011.
- [BOG79] Bogojawlenskij, K.N.; Neubauer, A.; Ris, V.W.: Technologie der Fertigung von Leichtbauprofilen, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1979.
- [BOM09] Boman, R.; Depauw, A.; Herisson, D.; Ponthot, J.-P.: Stationary Roll Forming Simulation using Arbitrary Lagrangian Eulerian Formalism, Proceedings of 1st International Congress on Roll Forming: RollFORM '09, Bilbao 2009.
- [BOQ11] Bo, Q.; Qiang, L.: A Novel Control Procedure for Single Axis Roll Forming, Advanced Materials Research Vol. 181-182, pp. 177-182, 2011.
- [BHA84] Bhattacharayya, D.; Smith, P.D.; Yee, C.H.; Collins I.F.: The Prediction of Deformation Length in Cold Roll Forming, Journal of Mechanical Working Technology, Vol. 9, pp. 181-191, 1984.

- [CHU98] Chung, W.J.; Cho, J.W.; Belytschko, T.: On the dynamic effects of explicit FEM in sheet metal forming analysis, Engineering Computations, Vol. 15 Issue: 6, pp.750 – 776, 1998.
- [DAN07] Daniel, W.J.T.; Meehan, P.A.: Implicit Finite Elements Study of Non-Steady Effects in Cold Roll Forming, 5th Australien Congress on Applied Mechanics, Brisbane 2007.
- [DÖH06] Döhren, H.J.: Neue Profile für Fassaden- und Dachsysteme, Tagungsband zum 9. Umformtechnischen Kolloquium Darmstadt, Meisenbachverlag, Bamberg, 2006.
- [DOE10] Doege, E., Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik, Grundlagen, Technologien, Maschinen, 2., bearbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2010.
- [DIN50961] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 50961:2000-09 Galvanische Überzüge - Zinküberzüge auf Eisenwerkstoffen - Begriffe, Korrosionsprüfung und Korrosionsbeständigkeit. Beuth Verlag, Berlin 2000.
- [DIN8582] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 8582 Fertigungsverfahren Umformen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe, alphabetische Übersicht. Beuth Verlag, Berlin 2002.
- [FAG09] Fagor Arrasate: Flexible rollforming for the automotive industry, Company Journal, 2nd Semester, 2009.
- [FAR02] Farzin, M.; Salmani Tehrani, M.; Shameli, E.: Determination of Buckling Limit of Strain in Cold Roll Forming by the Finite Element Analysis, Journal of Materials Processing Technology Vol. 125-126, pp. 626-632, 2002.
- [FEW90] Fewtrell, J.; An Experimental Analysis of Operating Conditions in Cold Roll Forming, Ph. D. Thesis, University of Aston in Birmingham, 1990.
- [FRI08a] Friedrich, H. E.; Treffinger, P.; Kopp, G.; Knäbel, H: Werkstoffe und Bauweisen ermöglichen neue Fahrzeugkonzepte, Forschung für das Auto von Morgen, Springer Verlag, Berlin, 2008.
- [FRI08b] Fritz, A.H., Schulze, G. (Hrsg.): Fertigungstechnik, 8., neu bearbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2008.
- [FRO98] Free On-Line Dictionary of Computing: <http://foldoc.org/wallclocktime>, aufgerufen 29.11.2011.
- [FÜL10] Füller, K.-H.: Metallischer Leichtbau im Rohbau – Herausforderung für die Umformtechnik, , 7. Fachtagung Walzprofilieren, Darmstadt, 2010.

- [GAL06] Galakhar, A.; Daniel, W. J.T.; Meehan, P.: Review of Contact and Dynamic Phenomena in Cold Roll Forming, ARC Linkage Project Report (LP0560270), Research Report No: 2006/16.
- [GEH06] Gehring A.; Beurteilung der Eignung von metallischem Band und Blech zum Walzprofilieren; Dissertation; Karlsruhe; 2006
- [GRO05] Groche, P.; Zettler, A.: Flexibles Profilieren für Leicht“BAU“anwendungen. In: thema FORSCHUNG 1/2006, Verlag für Marketing und Kommunikation, Monsheim, pp. 26-29
- [GRO07] P. Groche, M. Henkelmann, S. Berner, P. Götz, “Kaltprofile für den Fahrzeugbau“, In: Werkstoffe und Komponenten für den Fahrzeugbau : 14. Sächsische Fachtagung Umformtechnik, Freiberg, Germany, ISBN 978-3-86012-329-4. , pp. 186-202.
- [GRO08] Groche, P.; Henkelmann, M.; Götz, P.; Berner, S.: Cold Rolled Profiles for Vehicle Construction, Proceedings of AutoMetForm 2008, Wroclaw, Poland.
- [GRO09] Groche, P.; Beiter, P.; Vogler, V.; Schmitt, W.; Berner, S.; Duschka, A.: Self-Adjustment in Flexible Roll-Forming Lines, Proceedings of 1st International Congress on Roll Forming: RollFORM '09, Bilbao 2009.
- [GRO10] Groche, P.; Zettler, A.; Berner, S.; Schneider, G.: Development and verification of a one-step-model for the design of flexible roll formed parts, International Journal of Material Forming, 9/2010, Springer, Paris.
- [GÜL07] Gülçeken ,E.; Abeé, A.; Sedlmaier, A.; Livatyali, H.:Finite Element Simulation of Flexible Roll Forming_A Case Study on Variable Width U Channel, Proceedings of 4th International Conference and Exhibition on Design and Production of MACHINES and DIES/MOLDS, Cesme 2007.
- [GUT10] Gutierrez, M. A.; Eguia, I.; Berner, S.; Hennigs, C.; Sedlmaier, A.; Agnello, A.; Bahillo, J.: “Proform: Profile Forming Innovation“, In: Proc. IDDRG Conference 2010. Tools and Technology for the Processing of Ultra High Strength Steels: Graz, Austria.
- [HAL06] Halmos, G.T. (Hrsg.); Roll forming handbook; CRC Press Taylor & Francis Group; Boca Raton; 2006
- [HAM08] Hama, T.; Iguchi, K.; Hishida, H.; Takuda, H.: Roll Forming Simulations of a Steel Sheet using Various Finite Element Method Codes, Proceedings of the 12th International Conference on Metal Forming 2008. Krakow 2008.
- [HEI07] Hein P., Daolio, G.; Munier, M.: Walzprofilieren von höherfesten Stählen für den Automobilbau, 5. Fachtagung Walzprofilieren, Darmstadt, 2007

- [HEN09] Henkelmann, M.: Entwicklung einer innovativen Kalibrierstrecke zur Erhöhung der Profilgenauigkeit bei der Verarbeitung von höher- und höchstfesten Stählen, Dissertation TU Darmstadt, Shaker Verlag Band 77, Aachen 2009.
- [HUE01] Hütte, H.: Untersuchungen zum Rückfederungsverhalten hochfester Stahlblechwerkstoffe beim Tiefziehen, Dissertation Universität Hannover, 2001.
- [IST02] Istrate, A.: Verfahrensentwicklung zum Walzprofilieren von Strukturbauteilen mit über der Längsachse veränderlichen Querschnitten, Dissertation TU Darmstadt, Shaker Verlag Band 55, Aachen 2002.
- [JIM82] Jimma, T.; Ona, H.: Prevention of Oil-Canning and Edge Buckling in the Cold Roll Forming Process of Wide Profiles, Proceedings of the Second International Conference on Rotary Metalworking Processes, 1982, pp. 247-256.
- [JUN03] Junge, K.; Mildenerger, U.; Wittmann, J.: Perspektiven und Facetten der Produktionswirtschaft : Schwerpunkte der Mainzer Forschung, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden, 2003.
- [LAN01] Lange, K. (Hrsg.): Umformtechnik Band 1: Grundlagen, Springer Verlag, Berlin, 1984.
- [LAR10] Larrañaga, J.; Berner, S.; Galdos, L.; Groche, P.: Geometrical accuracy improvement in flexible roll forming lines, AIP Conference Proceedings Volume 1315, pp. 557-562, Paris, 2010.
- [LAR11] Larrañaga, J.: Geometrical accuracy improvement in flexible roll forming process by means of local heating, Doctoral Thesis, Mondragon Universitea, 2011.
- [LIN07a] Lindgren, M.: Cold roll forming of a U-channel made of high strength steel, Journal of Materials Processing Technology Vol. 186, pp. 77–81, 2007.
- [LIN07b] Lindgren, M.: An improved model for the longitudinal peak strain in the flange of a roll formed U-channel developed by FE-analyses, Steel Research International 78/1, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 2007.
- [LIN09a] Lindgren, M., Ingmarsson, L.-O.: 3D roll-forming of hat-profile with variable depth and width, Proceedings of 1st International Congress on Roll Forming: RollFORM '09, Bilbao, 2009.
- [LIN09b] Lindgren, M.: Experimental and Computational Investigation of the Roll Forming Process, Doctoral Thesis, Lulea Schweden, 2009.
- [KOL58] Kollbrunner, C.F.; Meister, M.: Ausbeulen – Theorie und Berechnung von Blechen, Springer Verlag, Berlin, 1958.

- [KUI84] Kiuchi, M.; Koudabashi T.; Automated Design System of Optimal Roll Profiles for Cold Roll Forming, Proceedings of the Third International Conference on Rotatory Metalworking Processes, Kyoto 1984, pp.423-436.
- [MAR10] MSC.SOFTWARE CORPORATION: Volume A – E, Benutzerhandbuch, 2010.
- [NEU06] Neugebauer, R. (Hrsg.): Parallelkinamatische Maschinen, Springer Verlag, Berlin, 2006.
- [OEH63] Oehler, G.: Biegen unter Pressen, Abkantpressen, Abkantmaschinen, Walzenrundbiegemaschinen, Profilwalzmaschinen. Carl Hanser Verlag München, 1963.
- [ONA05] Ona H.: Study on Development of Intelligent Roll Forming Machine, Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Tools 2005, Verona Italien, 2005.
- [ONA08] Ona, H.; Sho, R.; Nagamachi, T.; Hoshi, K.: On Development of Flexible Cold Roll Forming Machine, ICTP 2008 - 9th International Conference on Technology of Plasticity, Gyeongju, Korea, 2008.
- [ONA10] Ona, H.; Sho, R.; Nagamachi, T.; Hoshi, K.: Development of Flexible Cold Roll Forming Machine Controlled by PLC, The 13th International Conference on Metal Forming, Toyohashi, Japan, 2010.
- [PIL99] Piller, F. T.; Waringer, D.: Modularisierung in der Automobilindustrie - neue Formen und Prinzipien, Shaker Verlag, 1999.
- [POK09] Poks, B.; Dietl, T.; Sedlmaier, A.: Computer Control for Roll Forming of Profiles with Discontinuous Cross Sections, Proceedings of 1st International Congress on Roll Forming: RollFORM '09, Bilbao, 2009.
- [PAR10] Paralikas, J.; Salonitis, K.; Chrysosouris, G.: Optimization of roll forming process parameters—a semi-empirical approach, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology Vol. 47, pp. 1041-1052, Springer-Verlag 2010.
- [RÖC08] Röcker, O.: Untersuchungen zur Anwendung hoch- und höchstfester Stähle für walzprofilierte Fahrzeugstrukturkomponenten. Dissertation TU Berlin.
- [SCH96] Schuler (Hrsg.): Handbuch der Umformtechnik, Springer-Verlag, Berlin 1996
- [SMI90] Smith, D.: Die Design Handbook –Third Edition, McGraw-Hill Book Co. 1990.
- [STR96] N. Stricker, Entwicklung eines Technologieprozessors für die Stufenplanung beim Walz-profilieren, Dissertation der TU Darmstadt, Shaker Verlag 1996

- [SWE03] Sweeney, K.; Grunewald, U.: The Application of Roll Forming for Automotive Structural Parts, Journal of Materials Processing Technology Vol. 132, pp. 9–15, 2003.
- [TÖL70] Tölke, K.-D.: Unerwünschte Verformungen und Profilkrümmungen beim Walzprofilieren, Dissertation Universität Hannover, 1970.
- [VOG10] Vogler, F.; Berner, S.; Groche, P.: Erhöhung der Bauteilgenauigkeit beim flexiblen Profilieren, 7. Fachtagung Walzprofilieren, Darmstadt, 2010.
- [WAN11] Wang, G.-Y.; Bo, Q.; Qiang, L.; Yu, Y.: Research on Variable Time-Domain Discrete Interpolation Control in Flexible Roll Forming, Applied Mechanics and Materials Vol. 55-57, pp. 1687-1692, 2011.
- [WRI01] Wriggers, P.: Nichtlineare Finite-Element-Methoden, Springer Verlag, Berlin, 2001.
- [YAN10] Yan, Y.; Qiang, L.: FEM modeling and mechanics analysis of flexible roll forming, Applied Mechanics and Materials Vol. 44-47, pp. 132-137, 2010.
- [ZET06] Zettler, A., Groche, P., Berner, S.: Analytic one-step-model for the design of flexible roll formed parts, Proc. of Esaform 2006 – The 9th International on Material Forming, Glasgow, UK, pp. 215 – 218, 2006.
- [ZET07] Zettler, A.: Grundlagen und Auslegungsmethoden für flexible Walzprofilierprozesse. Dissertation TU Darmstadt, Shaker Verlag Band 71, Aachen 2007.

10.2 Patente und Gebrauchsmuster

- [P01] DE102007011849 A1: Vorrichtung und Verfahren zum Walzprofilieren von Profilen mit veränderlichem Querschnitt; Veröffentlichungsdatum: 18.09.2008; Anmelder: DATA M SHEET METAL SOLUTIONS GMBH, Erfinder: Bachthaler, A.; Freitag, S.; Sedlmaier, A.
- [P02] CN101698211 A: Double-shaft and variable-cross section roll forming machine; Veröffentlichungsdatum: 28.04.2010; Anmelder: NORTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY; Erfinder: Jing Zuojun; Liu Jiying; Ma Manhua; Ai Zhengqing.
- [P03] WO2009/013017 A4: Flexibler Niederhalter für eine Profilieranlage zum flexiblen Walzprofilieren von Kalt- oder Warmprofilen mit veränderlichem Querschnitt, Veröffentlichungsdatum: 29.01.2009; Anmelder: DATA M SHEET METAL SOLUTIONS GMBH, Erfinder: Freitag, S.; Sedlmaier, A.; Abee, A.

- [P04] WO2010/136509 A2: Walzprofiliervorrichtung und –verfahren, Veröffentlichungsdatum: 02.12.2010; Anmelder: DATA M SHEET METAL SOLUTIONS GMBH, Erfinder: Sedlmaier, A.; Freitag, S.; Poks, B.; Abee, A.
- [P05] WO2007/008152 : Roll-Forming Machine and Method for Roll-Forming a Hat-Shaped Profile, Veröffentlichungsdatum: 18.01.2007; Anmelder: ORTIC 3D AB, Erfinder: Ingvarsson, L.
- [P06] EP000002279806 A1: Roll forming apparatus, Veröffentlichungsdatum: 02.02.2011; Anmelder: KALZIP GMBH, Erfinder: Koschyk, N.
- [P07] US000004558577 A: Roll-forming machine for making articles having cross-sectional configuration varying lengthwise, Veröffentlichungsdatum: 17.12.1985; Anmelder: Institut Metallov, Erfinder: Trishevsky, I.
- [P08] DE000003022671 A1: Profiliermaschine und Verfahren zur Herstellung eines Profils, Veröffentlichungsdatum: 14.01.1982; Anmelder: Krückels, G., Erfinder: N.N.
- [P09] DE000002521620 A1: Verfahren und Vorrichtung zum Profilwalzen, Veröffentlichungsdatum: 11.12.1975; Anmelder: Colbath, D. L., Erfinder: Colbath, D. L.
- [P10] WO002008092424 A3: Verfahren Und Vorrichtung Zum Herstellen von Profilen mit in Längsrichtung unterschiedlich weit gebogenen Biegewinkeln, Veröffentlichungsdatum: 27.11.2008; Anmelder: Groche P., Erfinder: Groche P., Henkelmann, M.
- [P11] DE10210807 A1: Profilteil, Vorrichtung und Verfahren zu seiner Herstellung sowie Verwendung des Profilteils, Veröffentlichungsdatum: 02.10.2003; Anmelder: Kronenberg Profil GmbH, Erfinder: Bültmann, P.
- [P12] DE000010011755 A1: Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen von Bauteilen mit über der Längsachse veränderlichen Querschnitten, Veröffentlichungsdatum: 20.09.2001; Anmelder: Groche, P., Erfinder: Groche, P., Istrate, A.

11 Anhang

11.1 Werkstoffkennwerte der verwendeten Versuchswerkstoffe

Im Rahmen der Leichtbaubestrebungen geht der Trend beim Einsatz von Stahl hin zu höheren Festigkeiten. Beispielhaft für diese Werkstoffe werden im Rahmen der Arbeit die Stahlgüten ZStE 340, TRIP 700 und PM 800 ausgewählt. Die für die Simulation verwendeten Fließkurven wurden im Zugversuch aufgenommen und nach Ludwik extrapoliert.

$$k_f = c \varphi^n$$

Formel 11-1

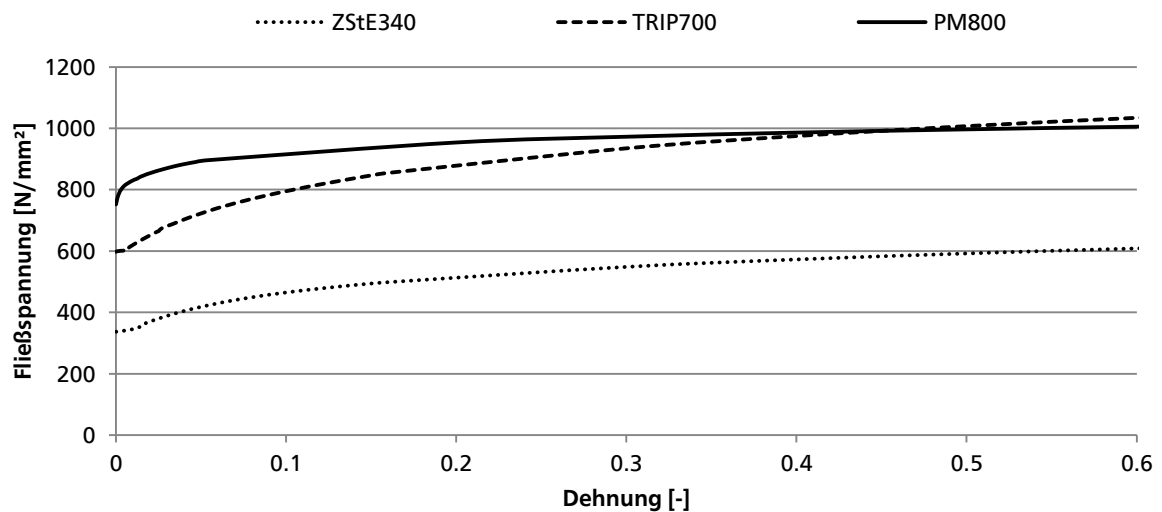


Abbildung 11-1: Verwendete Fließkurven von ZStE340, TRIP700 und PM800

Wissenschaftlicher Werdegang

Schulausbildung

1985 – 1989	Grundschule Dottingen
1989 – 1991	Gymnasium Münsingen
1991 – 1998	Albert Einstein Schule Gross Bieberau
1998	Abitur, allgemeine Hochschulreife

Studium/Ausbildung

2000 – 2000	Studium Maschinenbau, Hochschule Darmstadt
2000 – 2006	Studium des allgemeinen Maschinenbaus, Technischen Universität Darmstadt
07/2006	Abschluss Diplom-Ingenieur

Berufspraxis

2006 – 2011	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU), Technische Universität Darmstadt
-------------	---